

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CESAR MATEUS SCHUMACHER LOMPA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM RESERVATÓRIO ELEVADO: COMPARAÇÃO
ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL**

TOLEDO

2021

CESAR MATEUS SCHUMACHER LOMPA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM RESERVATÓRIO ELEVADO: COMPARAÇÃO
ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL**

**Structural analysis of an elevated reservoir: comparison between analytical
and computational calculation methods**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Rodnny Jesus Mendoza Fakhye.

TOLEDO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CESAR MATEUS SCHUMACHER LOMPA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM RESERVATÓRIO ELEVADO: COMPARAÇÃO
ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26/Novembro/2021

Rodny Jesus Mendoza Fakhye
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gustavo Savaris
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Gustavo Venâncio Da Silva Ramos
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**TOLEDO
2021**

Dedico este trabalho à minha mãe
Marlice (in memoriam) e
ao meu pai Airton.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter sido tão generoso comigo, me permitindo concluir essa graduação.

A minha mãe Marlice que mesmo falecida antes da graduação me apoiou desde pequeno para conseguir atingir objetivos na vida, e com toda a certeza me envia boas energias de onde ela está.

Ao meu pai Airton que me apoiou imensamente durante todo esse tempo, mesmo com diversas dificuldades enfrentadas.

A todos os professores de Engenharia Civil da UTFPR Câmpus Toledo que contribuíram para minha formação. Em especial ao meu orientador Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye, que aceitou me orientar, e com dedicação, ensinamentos e confiança proporcionou esse trabalho ser realizado.

Aos meus amigos que me ajudaram nos desafios da graduação.

E a todos que contribuíram indiretamente pela conclusão dessa etapa, meus eternos agradecimentos.

RESUMO

Um reservatório é um elemento de engenharia que resolve a demanda da sociedade em acumular líquidos. No presente trabalho o reservatório elevado possui 4,40 metros de diâmetro e 27,40 metros de altura, contendo duas células, sendo a primeira célula com 7,70 metros de altura, a segunda célula com 5,30 metros. O cálculo analítico nesse trabalho foi realizado com a utilização dos ábacos de Hangan e Soare (1959) para o cálculo de esforços nas paredes, e as equações de Timoshenko e Woinowosky-Krieger (1959) no cálculo de esforços nas lajes. Para análise empregando o Método dos Elementos Finitos, devido ao elevado número de equações, torna-se necessário um programa para problemas complexos, nesse trabalho o programa SAP2000 foi o utilizado. Analisando os resultados conclui-se que o projeto usando os valores fornecidos pelo método analítico retorna grande parte dos valores de esforços superiores ao Método dos Elementos Finitos, sendo um projeto a favor da segurança. Ocorreu em alguns casos o método analítico apresentar valores inferiores ao Método dos Elementos Finitos, porém, vale ressaltar que esta é uma análise linear elástica e que os fatores de segurança fazem o papel de ajuste nestas situações.

Palavras-chave: reservatório elevado; concreto armado; método dos elementos finitos; ábacos.

ABSTRACT

A reservoir is an engineering element that solves society's demand to accumulate liquids. In the present work, the elevated reservoir is 4.40 meters in diameter and 27.40 meters high, containing two cells, the first cell being 7.70 meters high, the second cell with 5.30 meters. The analytical calculation in this work was performed using Hangan and Soare's (1959) abacus for the calculation of wall forces, and the equations of Timoshenko and Woinowosky-Krieger (1959) for the calculation of slab efforts. For analysis using the Finite Element Method, due to the high number of equations, a program for complex problems becomes necessary, in this work the SAP2000 program was used. Analyzing the results, it is concluded that a project using the values provided by the analytical method returns a large part of the effort values superior to the Finite Element Method, being a project in favor of safety. In some cases, the analytical method has shown lower values than the Finite Element Method, however, it is noteworthy that this is a linear elastic analysis and that the safety factors play the role of adjustment in these situations.

Keywords: elevated reservoirs; reinforced concrete; finite element method; abacuses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Projeto de reservatório em Ilha das Cobras, 30 de agosto de 1909 ..	17
Figura 2 - Projeto de reservatório em Ilha do Boqueirão, 15 de maio de 1910 ..	18
Figura 3 - Projeto de reservatório em Ilha do Boqueirão, 15 de maio de 1910 ..	19
Figura 4 - Classificação dos reservatórios quanto ao sistema construtivo.....	20
Figura 5 - Mecanismo de colapso e distribuição de momento fletor.....	22
Figura 6 - Classes estruturais mais comuns.	26
Figura 7 - Tensões de flexão são desconsideradas no estudo de membranas.	27
Figura 8 - Mísulas em reservatório de duas células.....	31
Figura 9 - Mísulas na ponte sobre o Rio Maquiné - RS.....	31
Figura 10 - Mísulas verticais e mísulas horizontais	32
Figura 11 - Arestas dos reservatórios com mísulas e sem mísulas	32
Figura 12 - Influência das mísulas nos momentos fletores.....	33
Figura 13 - Pontos críticos para abertura de fissuras.....	33
Figura 14 - Classe de agressividade para o cobrimento de reservatórios.....	35
Figura 15 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração	35
Figura 16 - Planta baixa do reservatório	37
Figura 17 - Reservatório em cortes	38
Figura 18 - Exemplo de laje com malha de 384 elementos.....	39
Figura 19 - Deslocamentos na malha escolhida.....	48
Figura 20 - Reservatório modelado	49
Figura 21 - Esforços na parede do reservatório com parede de 20 cm.....	51
Figura 22 - Esforços na parede do reservatório com parede de 35 cm.....	52
Figura 23 - Esforços nas lajes de fundo no reservatório com parede de 20 cm	54
Figura 24 - Esforços nas lajes de fundo no reservatório com parede de 35 cm	54
Gráfico 1 - Erro relativo para o deslocamento no centro das lajes de fundo	47
Gráfico 2 - Erro relativo para o deslocamento no centro das lajes de tampa....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Verificação para as lajes engastadas.....	46
Tabela 2 - Verificação para as lajes articuladas	46
Tabela 3 - Esforços na parede (Parede de 20 cm)	50
Tabela 4 - Esforços na parede (Parede de 35 cm)	50
Tabela 5 - Esforços nas lajes (Parede de 20 cm).....	52
Tabela 6 - Esforços nas lajes (Parede de 35 cm).....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Normas Brasileiras
SMAS	Secretaria Municipal de Assistência Social

LISTA DE SÍMBOLOS

M_r	Momento fletor radial
M_t	Momento fletor tangencial
a	Raio da laje circular
q	Carga uniformemente distribuída
r	Posição radial considerada
ν	Coefficiente de Poisson
H	Altura do reservatório
h	Espessura da parede do reservatório
h'	Espessura da laje de fundo do reservatório
y_0	Ordenada do momento fletor nulo
y_1	Ordenada do momento fletor máximo
M_0	Momento fletor no engastamento
M'	Momento fletor máximo
$N_{\theta máx}$	Força normal máxima
y_2	Ordenada da força normal N_{θ} máxima
w	Abertura de fissuras
γ	Peso específico da água
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante
D	Rigidez à flexão da laje
δ_{MEF}	Deslocamento no centro da laje calculado pelo MEF
$\delta_{analítico}$	Deslocamento no centro da laje calculado pelo método analítico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivo específico	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Reservatórios	16
2.1.1	Classificação dos reservatórios	19
2.2	Concreto armado	23
2.3	Análise estrutural	23
2.3.1	Lajes circulares.....	23
2.3.2	Teoria da membrana	26
2.3.3	Método dos elementos finitos	27
2.3.4	Método analítico utilizando ábacos de Hangan e Soare (1959)	28
2.4	Considerações construtivas	30
2.4.1	Mísulas	30
2.4.2	Abertura de fissuras	34
2.4.3	Impermeabilização	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Método analítico	41
4.1.1	Cálculo de esforços da laje de fundo da célula 1	41
4.1.2	Cálculo de esforços da laje de fundo da célula 2	42
4.1.3	Cálculo de esforços nas lajes de tampa	42
4.1.4	Cálculo de esforços na parede da célula 1	43
4.1.5	Cálculo de esforços na parede da célula 2.....	44
4.2	Método computacional	45
4.2.1	Análises de convergência para as malhas	45
4.2.2	Comparação entre MEF e cálculo analítico.....	49
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXO A - Ábaco para determinar o momento M0	61
	ANEXO B - Ábaco para determinar a ordenada y0	63

ANEXO C - Ábaco para determinar a ordenada y_1.....	65
ANEXO D - Ábaco para determinar o momento M'.....	67
ANEXO E - Ábaco para determinar a ordenada y_2.....	69
ANEXO F - Ábaco para determinar o esforço $N\theta_{máx}$.....	71

1 INTRODUÇÃO

A constante necessidade de acúmulo de líquidos para diferentes fins levou a humanidade a desenvolver estruturas que pudessem realizar essa tarefa, de maneira segura e eficiente. O estudo do comportamento de tais estruturas torna-se importante para garantir projetos econômicos e seguros.

Segundo Ramos (2010), reservatórios são de grande importância para a sociedade, podendo ser empregados em Estações de Tratamento de Águas (ETA), em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), em Reservatórios de Acumulação (RA), sendo que os RA atendem o consumo da população quando a vazão originária dos pontos de tomada de água é insuficiente, já os reservatórios de distribuição são utilizados para assegurar o volume necessário de água para abastecer a população.

De acordo com Guerrin e Lavaur (2002) uma consideração de importância a ser analisada durante a fase de projeto é verificar qual líquido será armazenado no reservatório, podendo ser água, vinho, cerveja, cidra; cisternas de produtos negros (alcatrão, betume); reservatórios de hidrocarbonetos que pode englobar petróleo, gasolina, óleo diesel, óleos minerais, etc.

Os reservatórios são divididos, estruturalmente, em elevados, apoiados e enterrados. Os primeiros possuem maior influência das ações devidas ao vento, ao passo que os últimos incluem carregamento devido ao empuxo do solo.

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados para a execução de reservatórios. Segundo Mehta e Monteiro (1994), o concreto armado é empregado nesse tipo de estrutura devido à resistência do mesmo frente à presença de líquidos. Além disso, o concreto armado quando bem executado é um ótimo material para atuar a favor da estanqueidade dos reservatórios e do armazenamento dos líquidos. Somado a isso, o emprego desse material de construção dá maior liberdade aos projetistas em determinar a forma e as dimensões da estrutura.

No caso de reservatórios cilíndricos a principal vantagem desse formato em relação a outros possíveis formatos é que, sob o efeito de pressões hidrostáticas, a principal solicitação nas suas paredes é a de tração, apresentando solicitações devido à flexão ortorradial (flexão na direção perpendicular ao raio) apenas na consideração dos efeitos de borda (SCHEFFER, 2010).

1.1 Justificativa

Existem diversos métodos que podem ser utilizados para a análise e determinação dos esforços nas estruturas cilíndricas de reservatórios.

Um dos métodos consiste na aplicação de equações algébricas a partir de fatores geométricos e relações fornecidas por ábacos. No caso específico de reservatórios cilíndricos existem diversos métodos aproximados de cálculo no qual muitos desses reservatórios foram projetados.

Outro método de cálculo que pode ser empregado no projeto de reservatórios cilíndricos é o Método dos Elementos Finitos (MEF). Na análise de uma estrutura pelo Método dos Elementos Finitos certos cuidados devem ser tomados quanto à modelagem, tais como: o tipo de elemento a ser adotado, a escolha da malha, a definição dos graus de liberdade, as regiões com descontinuidade geométrica e de introdução de solicitações, os sistemas de referência para solicitações internas e externas, visto que esses fatores dependem as condições de convergência e a precisão da solução do MEF (MAJUL, 2015).

O presente trabalho realiza a comparação de um método analítico de cálculo com um método computacional como o Método dos Elementos Finitos, de modo a fazer ponderações a respeito do uso de cada método para o cálculo estrutural de um reservatório cilíndrico. O processo de cálculo do Método dos Elementos Finitos se dá com o uso de um elevado número de equações, dessa forma, é necessário utilizar programas computacionais, para este trabalho será utilizado o programa SAP2000, amplamente utilizado na área de cálculo estrutural e com licença disponível no campus Toledo da UTFPR.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Realizar a análise estrutural de um reservatório cilíndrico elevado e comparar os resultados de esforços internos obtidos através de um método analítico de cálculo com métodos computacionais.

1.2.2 Objetivo específico

- Calcular os esforços internos das paredes do reservatório usando os Ábacos de Hangan e Soare (1959).
- Obter os esforços internos da laje de fundo do reservatório através das equações de flexão deduzidas por Timoshenko e Woinowosky-Krieger (1959);
- Realizar uma análise computacional por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o programa SAP2000.
- Comparar e verificar a precisão, vantagens e desvantagens de cada método.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reservatórios

Guerrin e Lavour (2002) definem reservatórios como sendo “um recipiente contendo um líquido”. Os reservatórios não armazenam apenas água, apesar de que a água seja um dos principais líquidos para os quais são utilizados os reservatórios. Entre os líquidos que podem ser armazenados em reservatórios é possível citar o vinho, a cerveja, os hidrocarbonetos, o betume, o leite, dentre outros.

De acordo com Kirby et al. (1956) as sociedades antigas consideravam de grande importância os reservatórios, assim como as sociedades modernas, os métodos construtivos variam de reservatórios construídos em rochas sãs da antiguidade (25 a.C.) até atualmente os reservatórios modernos de concreto armado e concreto protendido. Um dos fatores para essas construções possuírem papel de importância é devido ao fato que elas podem servir de solução para a distribuição de água em épocas críticas.

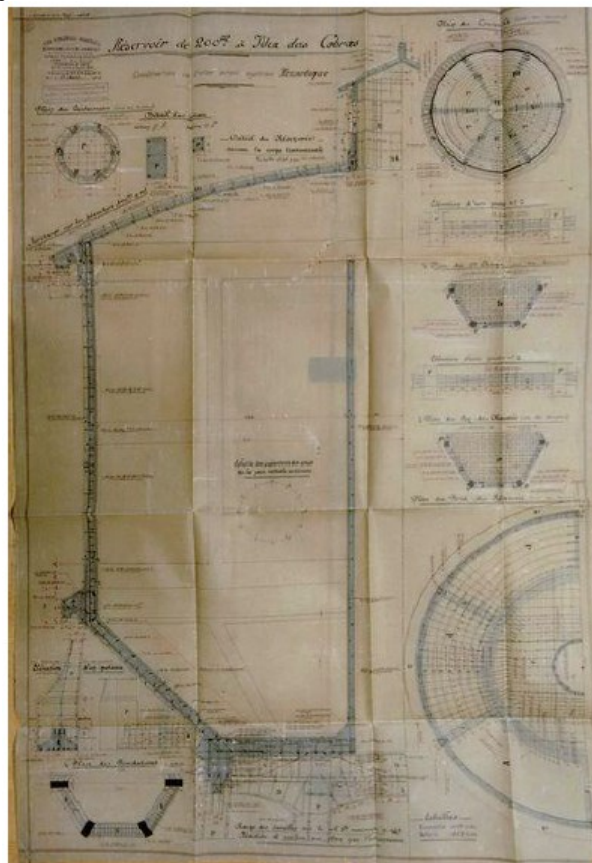
O concreto armado, material desenvolvido por François Hennebique em 1886, a partir da invenção de Joseph Monier, patenteada em 1877-1878 fez parte das inovações construtivas que a revolução industrial possibilitou no fim do século XIX (MORAES e PASSALACQUA, 2017).

No Brasil, a empresa de Hennebique, a Maison Hennebique, desenvolveu projetos de reservatórios no início do século XX. De acordo com os documentos foram executados 3 projetos de reservatórios, o Reservatório Ilha das Cobras (1909), o Reservatório Ilha das Flores (1909) e o Reservatório Ilha do Boqueirão (1910). Todo o corpus documental sobre os projetos realizados para o Brasil (cartas, memoriais de cálculo, croquis e projetos) faz parte da coleção *Bétons Armés Hennebique (BAH)* do *Centre d'archives de l'Institut français d'architecture*, em Paris. A lista completa dos arquivos de arquitetura do século XX está disponível para consulta online (MORAES e PASSALACQUA, 2017).

O reservatório Ilha das Cobras, localizado no Rio de Janeiro, trata-se de um reservatório de 200 m³ para a base da Marinha. Destaca-se a estabilidade da construção em concreto armado, pois, em 1910, o reservatório sofreu danos em um bombardeamento da base, mantendo-se, entretanto, sólido e estável, construção que

continua até hoje na base da Marinha, é possível visualizar o seu projeto na Figura 1 (MORAES e PASSALACQUA, 2017).

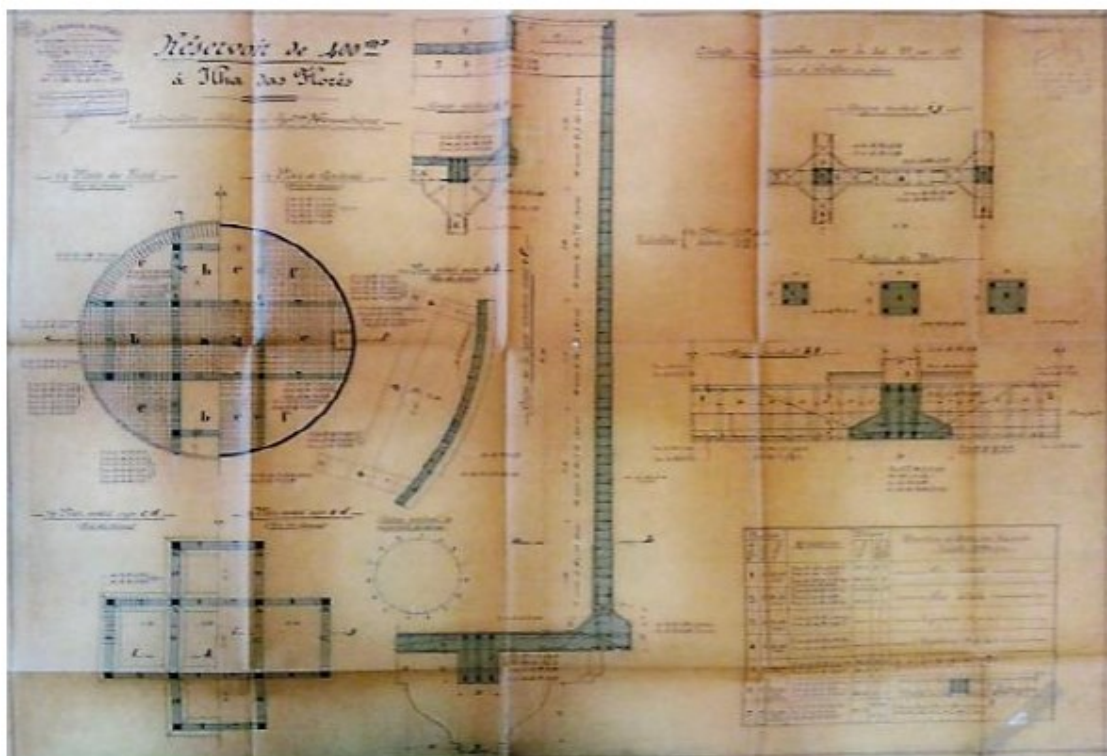
Figura 1 - Projeto de reservatório em Ilha das Cobras, 30 de agosto de 1909



Fonte: Moraes e Passalacqua (2017)

O projeto do reservatório de Ilha das Flores, também no Rio de Janeiro, foi solicitado simultaneamente ao de Ilha das Cobras, também para uma base da Marinha. Para esse novo reservatório, entretanto, a capacidade desejada era de 400 m³. O reservatório ainda existe na base da Marinha, é possível visualizar o seu projeto na Figura 2 (MORAES e PASSALACQUA, 2017).

Figura 2 - Projeto de reservatório em Ilha do Boqueirão, 15 de maio de 1910

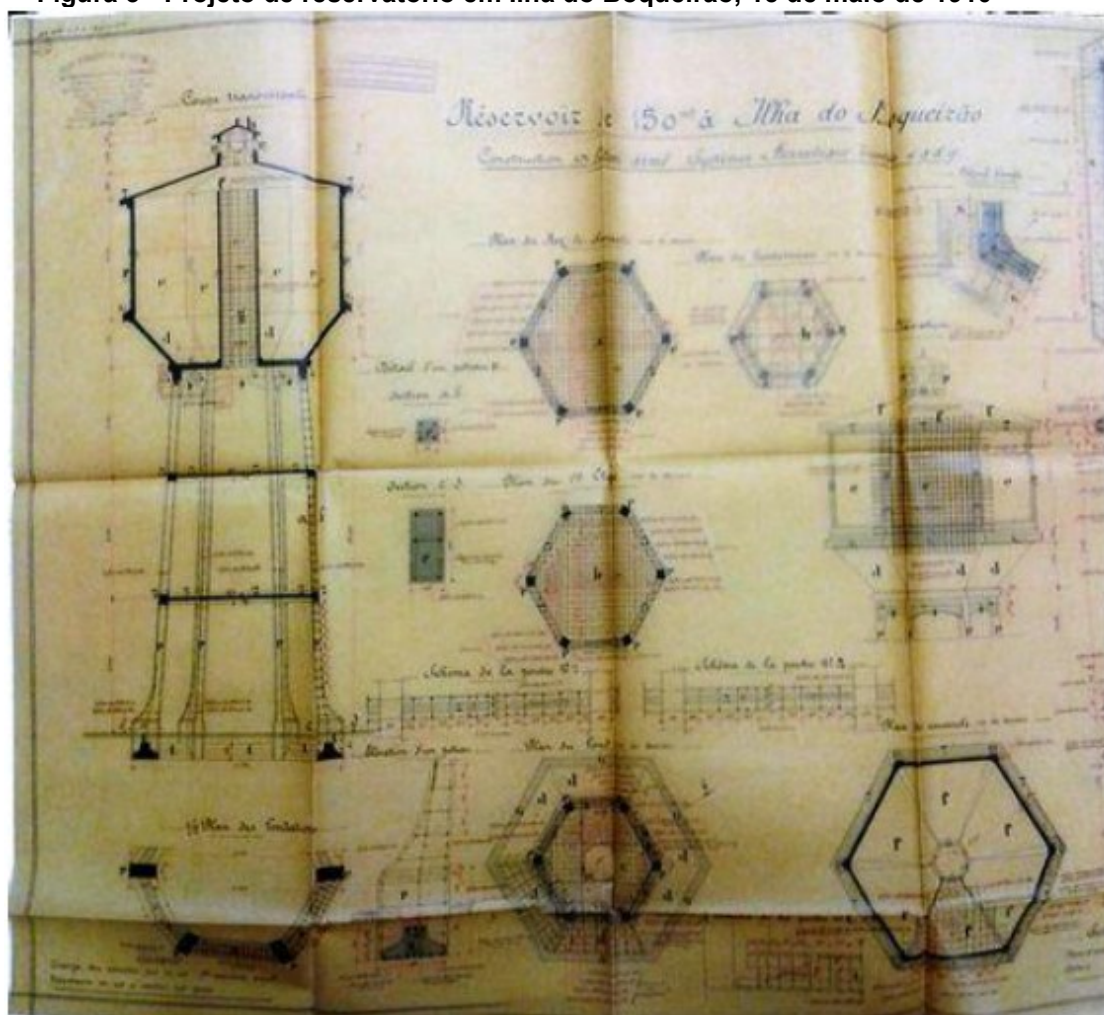


Fonte: Moraes e Passalacqua (2017)

O projeto do reservatório Ilha do Boqueirão (Figura 3), no Rio de Janeiro, projeto bastante similar ao reservatório Ilha das Cobras, com a diferença que ao invés de cilíndrico ele tem o formato hexagonal. O reservatório Ilha do Boqueirão é outro construído pela empresa de Maison Hennebique que resistiu a uma explosão no Brasil, no dia 16 de julho de 1995, a qual provocou um forte abalo nas áreas adjacentes à Baía de Guanabara, principalmente na Ilha do Governador e outros bairros da cidade, além de Niterói e São Gonçalo, num raio de 50 quilômetros (GLOBO, 1995).

A causa da explosão foi o armazenamento de munição velha nos paióis da Marinha, que não se desfez da munição para canhões calibre 127 mm pois as usaria em exercícios de tiro no oceano Atlântico. O reservatório está localizado a poucos metros de onde ocorreram as explosões, e ainda existe em plena forma nos dias atuais.

Figura 3 - Projeto de reservatório em Ilha do Boqueirão, 15 de maio de 1910



Fonte: Moraes e Passalacqua (2017)

Thomaz (2020) compilou uma série de informações sobre as obras de Hennebique no Brasil em um relatório de pesquisa, o autor corrobora com as informações de Moraes e Passalacqua (2017) acrescentando imagens originais dos projetos, e demonstrando com auxílio de imagens provenientes de reportagens de televisão as explosões ocorridas. Além disso, acrescenta diversas obras executadas por Hennebique no Brasil.

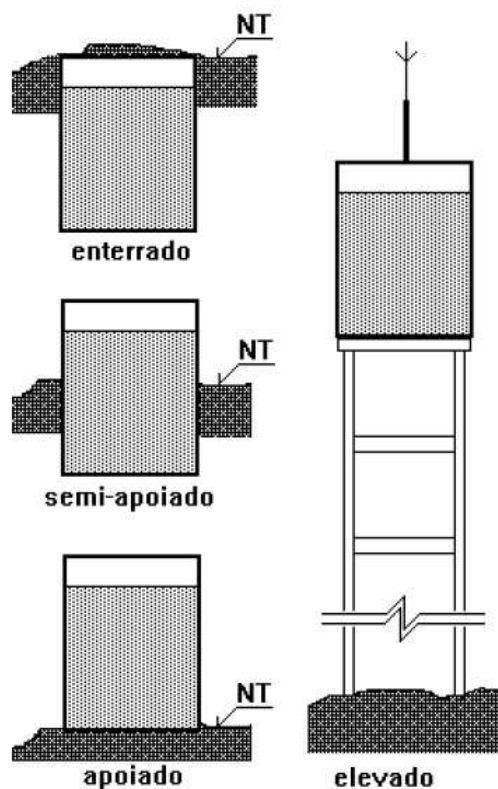
2.1.1 Classificação dos reservatórios

Segundo Hanai (1977) os reservatórios podem ser classificados basicamente em 3 critérios:

- a) Quanto à finalidade, podem ser classificados em reservatórios de acumulação ou reservatórios de equilíbrio;
- b) Quanto ao tamanho, classifica-os em pequenos, com capacidade até 500 m³, em médios com volume até 5000 m³, e em grandes aqueles reservatórios com capacidade maior que 5000 m³;
- c) Quanto aos sistemas construtivos, são classificados os reservatórios em elevados, enterrados e de superfície, com uma solução intermediária entre esses dois últimos que são os semi-enterrados.

A Figura 4 representa a classificação quanto aos sistemas construtivos.

Figura 4 - Classificação dos reservatórios quanto ao sistema construtivo



Fonte: Adaptado de Medeiros Filho (2009)

Ramos (2010) realiza a classificação dos reservatórios de acordo com oito critérios: função (distribuição ou equilíbrio, regularização de transporte ou reserva para combate de incêndio), implantação (enterrado, semienterrado, apoiado ou elevado), capacidade (pequenos, médios e grandes), forma (seção retangular, quadrada, circular ou variável), modo de encerramento (cobertos ou não cobertos), material de construção, configuração da construção e natureza do líquido armazenado.

Dentre as oito classificações que Ramos (2010) faz, quatro critérios são os mais relevantes:

- 1) Quanto à função:
 - a) distribuição ou equilíbrio;
 - b) regularização de transporte;
 - c) reserva para combate de incêndio.
- 2) Quanto ao tipo de implantação:
 - a) enterrado: quando o mesmo se encontra completamente abaixo da cota do terreno;
 - b) semienterrado ou semi-apoiado: quando possui uma parte da altura líquida abaixo do nível do terreno;
 - c) apoiado: a laje do fundo apoia-se no terreno, quando este possui capacidade de aguentar a carga solicitada;
 - d) elevado: está suspenso por estruturas de elevação, quando se quer garantir a pressão mínima na rede de distribuição.
- 3) Quanto à capacidade:
 - a) pequenos: volume menor que 50 m³;
 - b) médio: volume entre 50 e 200 m³;
 - c) grande: volume superior a 200 m³.
- 4) Quanto aos materiais empregados para sua construção:
 - a) aço;
 - b) alvenaria estrutural;
 - c) concreto armado;
 - d) concreto protendido;
 - e) argamassa armada;
 - f) fibra de vidro.

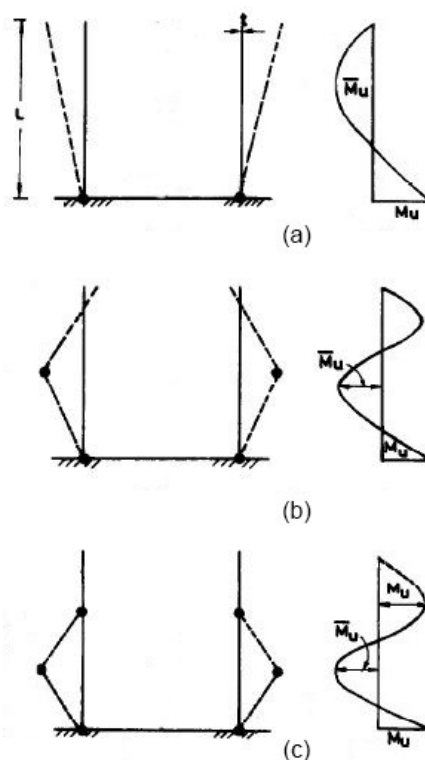
O comportamento estrutural do reservatório se deve também a classificação quanto à forma, de acordo com essa classificação é possível definir quais os melhores métodos de cálculo a utilizar. Guerrin e Lavour (2003, p. 14) citam reservatórios quadrados, retangulares, cilíndricos ou de forma qualquer. Os dois primeiros tipos apresentam maior facilidade construtiva, e de disposição no terreno. Os reservatórios

cilíndricos são mais eficientes na resistência às solicitações, devido a não sofrerem de momento ao redor do eixo angular, sendo principalmente solicitados à tração.

Ramanjaneyulu et al. (1993, p. 205, 209-214), realizam uma classificação específica quanto aos reservatórios cilíndricos, pois diferencia os reservatórios segundo o comportamento no instante de ruptura. A diferenciação dos reservatórios é então quanto à quantidade de rótulas plásticas circulares formadas no instante da ruptura, possível de observar na Figura 5, sendo os reservatórios denominados:

- a) curtos, quando apresentando apenas uma rótula, na base;
- b) médios, quando apresentando duas rótulas;
- c) compridos, quando apresentando três rótulas plásticas no instante da ruptura.

Figura 5 - Mecanismo de colapso e distribuição de momento fletor



Fonte: Adaptado de Ramanjaneyulu et al. (1993, p. 205, 209-214)

Segundo Filho (2013) os reservatórios elevados são indicados quando existe a necessidade de garantia de uma pressão mínima na rede, os demais reservatórios são utilizados quando as cotas piezométricas do terreno garantem a pressão mínima na rede.

2.2 Concreto armado

Kuehn (2002) afirma que seja devido ao custo ou facilidade construtiva, os reservatórios de concreto armado são empregados em grande escala, tanto no setor público como privado, reservando água potável para população, água para indústrias, produtos químicos e alimentícios, no tratamento de efluentes industriais ou domésticos.

Segundo Metha e Monteiro (1994) o concreto é o material ideal para confecção de estruturas com a função de controlar, estocar e transportar água, principalmente devido a sua resistência à ação da água e à durabilidade apresentada contra águas agressivas industriais e naturais, e em comparação com outros materiais como a madeira e o aço comum. Outro fator é que é possível realizar a execução de elementos de concreto armado das mais variadas formas e tamanhos.

De acordo com Andolfato (2002) para execução de obras utilizando concreto armado é necessário o emprego extensivo de mão de obra não qualificada e equipamentos simples. Manifestando ainda no final da execução, elevada resistência à ação do fogo; grande estabilidade, sob a ação de intempéries, dispensando trabalhos de manutenção; aumento da resistência à ruptura com o tempo; facilidade e economia na construção de estruturas contínuas, sem juntas.

De acordo com Guimarães (1995) os reservatórios cilíndricos em concreto armado são mais utilizados para uma capacidade de até mais ou menos 1500 m³, o seu maior problema consiste na fissuração, que pode ser eliminada com a utilização de baixa tensão na armadura ou com produtos de vedação para evitar os vazamentos que possam ocorrer devido à abertura de fissuras. Segundo Venturini (1979) a partir de 1500 m³ é aconselhável a utilização de concreto protendido, pois os gastos aumentariam em demasia para uma solução em concreto armado.

2.3 Análise estrutural

2.3.1 Lajes circulares

Timoshenko e Woinowosky-Krieger (1959) apresentam diversos métodos de cálculos para lajes circulares. No caso específico de placas circulares com bordas

articuladas com cargas distribuídas uniformemente em toda a laje, os esforços máximos são obtidos de maneira simples. A força cortante V , os momentos fletores na direção radial M_r , e os momentos fletores na direção circunferencial M_t são os esforços a serem calculados em lajes circulares.

As equações obtidas no estudo dos autores supracitados estão apresentadas para o caso específico de laje com bordas articuladas:

$$M_r = \frac{q^2}{16}(3 + \nu)(a^2 + r^2) \quad (1)$$

$$M_t = \frac{q}{16}[a^2(3 + \nu) - r^2(1 + 3\nu)] \quad (2)$$

onde:

M_r : momento fletor radial

M_t : momento fletor tangencial

a : raio da laje circular

q : carga uniformemente distribuída

r : posição radial considerada

ν : coeficiente de Poisson

No centro da laje, no caso de laje com bordas articuladas os momentos são iguais, pois $r=0$, dessa forma obtém-se:

$$M_r = M_t = \frac{qa^2}{16}(3 + \nu) \quad (3)$$

Para o caso específico de laje com bordas perfeitamente engastadas os momentos no centro dessas são obtidos com as Equações (4) e (5):

$$M_r = \frac{q}{16}[a^2(1 + \nu) - r^2(3 + \nu)] \quad (4)$$

$$M_t = \frac{q}{16}[a^2(1 + \nu) - r^2(1 + 3\nu)] \quad (5)$$

Assim, os momentos fletores na borda da laje circular de bordas engastadas são obtidos pelas Equações (6) e (7):

$$M_r = \frac{-qa^2}{8} \quad (6)$$

$$M_t = \frac{-vqa^2}{8} \quad (7)$$

No centro da laje circular com bordas engastadas os momentos são calculados com a Equação (8):

$$M_r = M_t = \frac{qa^2}{16}(1 + \nu) \quad (8)$$

Para o cálculo dos deslocamentos Timoshenko e Woinowosky-Krieger (1959) apresentam a Equação (9), que considera a rigidez à flexão de uma placa:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (9)$$

onde:

D : rigidez à flexão da placa

E : módulo de elasticidade

h : espessura da placa

O deslocamento máximo, que ocorre no centro de uma laje circular com bordas engastadas é calculado com a Equação (10):

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{qa^4}{64D} \quad (10)$$

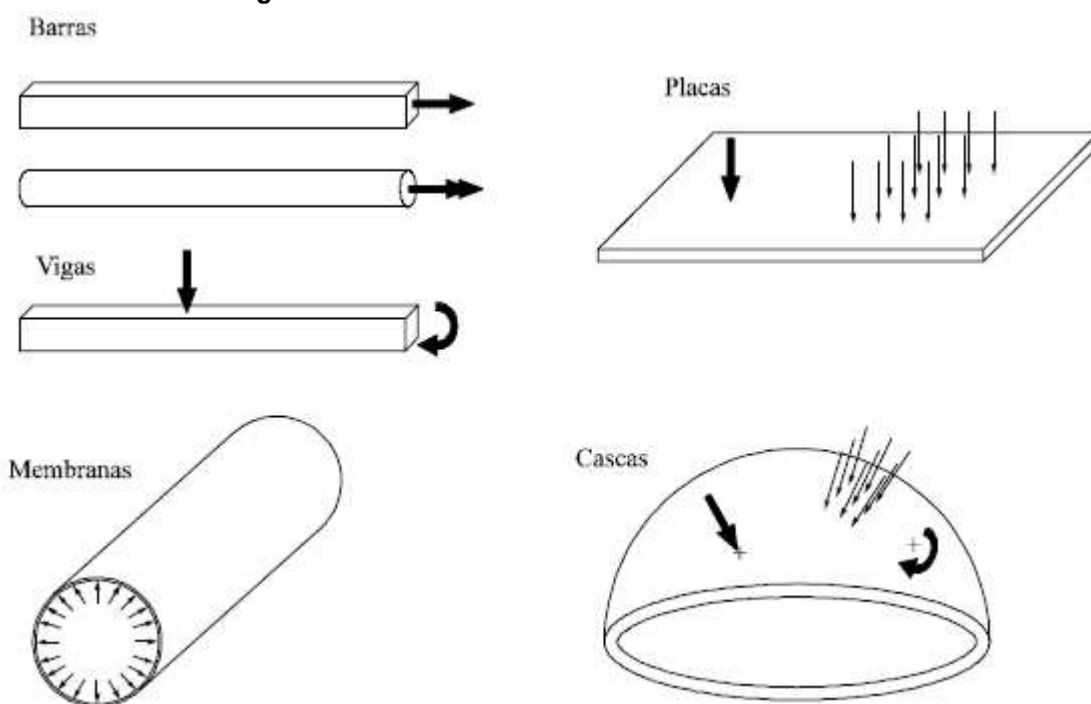
O deslocamento máximo, que ocorre no centro de uma laje circular com bordas articuladas é calculado com a Equação (11):

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{(5 + \nu)qa^4}{64(1 + \nu)D} \quad (11)$$

2.3.2 Teoria da membrana

As membranas são estruturas onde duas das dimensões são muito maiores que a terceira (espessura h), as placas finas possuem essa mesma característica, porém possuem carregamentos perpendiculares ao seu plano principal de tensões. Geralmente é considerado como casca fina uma estrutura em que a razão raio/espessura está entre 50 e 1000. Outras categorias dependem da geometria, cascas de revolução são as obtidas pela rotação de uma geratriz em torno de um eixo de revolução, cascas rasas são as cascas com curvatura pequena, e assim por diante (MARCKZAK, 1999). A Figura 6 apresenta os elementos estruturais mais comuns.

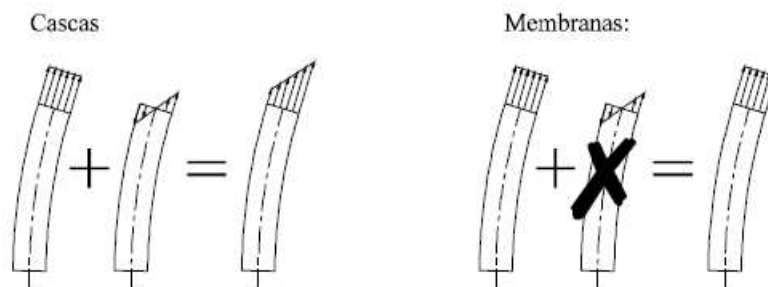
Figura 6 - Classes estruturais mais comuns.



Fonte: Marckzak (1999)

A aplicação das membranas é geralmente associada a vasos de pressão de parede fina, reservatórios, paredes pressurizadas, etc. De modo geral, a grande maioria dos componentes estruturais com espessura muito fina apresentam rigidez à flexão muito baixa em comparação com a rigidez de membrana. Nestes casos, as tensões originadas devido a flexão podem ser desprezadas em relação as tensões de membrana, como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Tensões de flexão são desconsideradas no estudo de membranas



Fonte: Marckzak (1999)

2.3.3 Método dos elementos finitos

Segundo Vaz (2011) após meados da década de cinquenta do século XX o Método dos Elementos Finitos (MEF) começou a ganhar destaque internacional. Dois trabalhos independentes foram responsáveis por esse destaque, um do professor do Imperial College de Londres John Argyris, e outro de um time de engenheiros da empresa Boeing.

Porém, em 1943 o problema de torção de Saint-Venant do matemático Richard Courant foi considerado o pioneiro do método. O baixo desenvolvimento da indústria computacional na época talvez explique o motivo desse trabalho não ter sido tão divulgado no período em que foi publicado (VAZ, 2011).

De acordo com Vaz (2011) o MEF é considerado um desenvolvimento natural da formulação em deslocamentos da análise matricial de estruturas reticuladas. Os conceitos de matriz de rigidez do elemento e a montagem da matriz de rigidez da estrutura são semelhanças entre os métodos. A maior diferença entre o MEF e o método anterior é a maior generalidade de aplicações do MEF, e os conceitos de métodos de energia e métodos aproximados, os quais são aplicados no MEF.

Ainda segundo Vaz (2011) o MEF pode ser utilizado também para estruturas contínuas bi e tridimensionais. Além disso, o MEF pode ser aplicado na análise dinâmica das estruturas, e na análise estática de estruturas que possuem não linearidade física e geométrica. Outras áreas também são contempladas pelo MEF, não somente a análise de estruturas, como por exemplo a engenharia geotécnica, a interação fluido-mecânica e as análises de fluxo térmico e hidráulico.

Segundo Azevedo (2003) em casos complexos, onde é necessária grande precisão de valores obtidos, é possível utilizar o método dos elementos finitos com maior número de nós e, dessa forma, maior número de graus de liberdade. Porém, a quantidade de equações que precisam ser resolvidas nesses casos é grande, resultando em matrizes de tamanho demasiado, demandando tempo para o processamento para a obtenção dos esforços. Atualmente, existem inúmeros programas comerciais altamente sofisticados que fazem os mais diversos tipos de análise pelo Método dos Elementos Finitos, tais como o SAP2000, Ansys, Abaqus, Catia entre outros.

Segundo CSI (1997) o nome SAP desde o início tem sido sinônimo de estado da arte de métodos numéricos, há mais de 30 anos. *Structural Analysis Program (S.A.P.)* foi desenvolvido pela empresa norte americana *CSI Computers and Structures*. O SAP2000 dispõe de uma interface sofisticada, intuitiva e versátil proporcionada por um sistema de análise estrutural poderoso e ferramentas de auxílio ao projeto, para engenheiros que trabalham com as mais variadas áreas do cálculo estrutural, seu ambiente de modelagem gráfica é baseado em objetos 3D e possui grande variedade de opções de análise e de projeto. O programa realiza verificações automáticas de dimensionamento em aço e concreto armado, segundo as normas dos EUA, Canadá e outros padrões internacionais.

2.3.4 Método analítico utilizando ábacos de Hangan e Soare (1959)

Com o desenvolvimento de equações para os esforços solicitantes, Hangan e Soare (1959) produziram uma metodologia que se fundamenta na utilização de ábacos para obter esses esforços, desenvolvidos para auxiliar no dimensionamento de reservatórios cilíndricos. Segundo Guimarães (1995), o trabalho de cálculo pode ser diminuído consideravelmente com a utilização de ábacos. Os ábacos de Hangan e Soare (1959) estão no Anexo A, consistindo nas Figuras 25 à 30.

De acordo com Guimarães (1995), ao se comparar os resultados obtidos nos ábacos com os obtidos através da utilização das equações da teoria de cascas tem-se apresentado bons resultados, facilitando o manuseio.

Para desenvolver os ábacos os valores da relação h/h' foram fixados nas abscissas, de modo que são obtidos valores para constantes K nas ordenadas os quais dependem do produto βH , onde:

$$\beta H = 1,307 \frac{H}{\sqrt{r h}} \quad (12)$$

sendo:

H : altura do reservatório

r : raio do reservatório

h : espessura da parede do reservatório

h' : espessura da laje de fundo do reservatório

Para o cálculo dos esforços solicitantes são utilizadas equações que relacionam coeficientes obtidos com os ábacos com fatores geométricos:

Ordenada y_0 do momento fletor nulo:

$$y_0 = K_0 * H \quad (13)$$

Ordenada y_1 do momento fletor máximo:

$$y_1 = K_1 * H \quad (14)$$

Momento fletor no engastamento:

$$M_0 = K * \gamma * H^3 \quad (15)$$

Segundo Guimarães (1995) no caso da parede vertical ser engastada na laje de fundo, tem-se h' tendendo ao infinito, portanto $h/h' \cong 0$, sendo esse o valor de h/h'

a ser considerado para verificar no ábaco o coeficiente K que determina o momento fletor no engastamento.

Momento fletor máximo:

$$M' = -K' * \gamma * H^3 \quad (16)$$

Ordenada y_2 da Força normal N_θ máxima:

$$y_2 = K_2 * H \quad (17)$$

Força normal máxima:

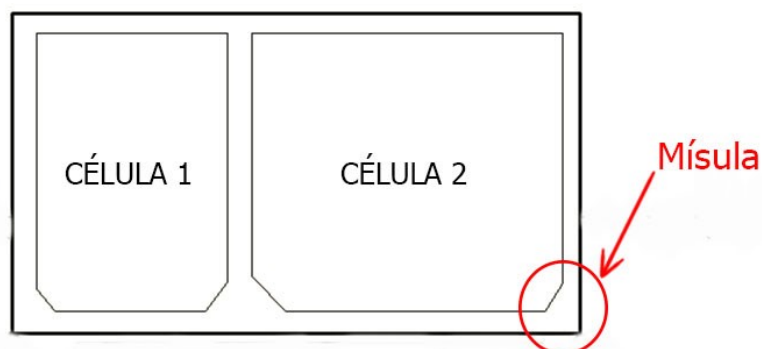
$$N_{\theta máx} = K'' * \gamma * r * H \quad (18)$$

Para as considerações de força de vento é necessário utilizar as definições da NBR 6123 (ABNT, 1988).

2.4 Considerações construtivas

2.4.1 Mísulas

De acordo com Ferreira (2010) mísula é um aumento de seção de uma peça (normalmente vigas) para mudar esforços dessa peça e da estrutura. As mísulas ajudam no recebimento de cargas, vindo da própria estrutura ou de fatores externos, na Figura 8 é possível observar mísulas em um reservatório com duas células.

Figura 8 - Mísulas em reservatório de duas células

Fonte: Adaptado de TQS Docs (2021)

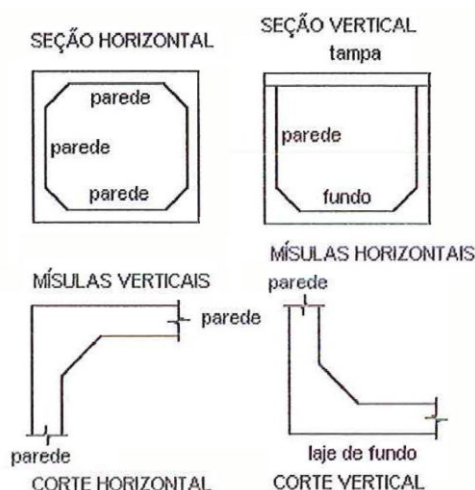
As mísulas são utilizadas em obras de médio e grande porte, dentre elas podemos citar edifícios e pontes. Na Figura 9 estão destacadas mísulas presentes na ponte sobre o Rio Maquiné, localizada no Km 64,6 da BR-101/RS, nas proximidades da cidade de Maquiné (BOLDO, 2008).

Figura 9 - Mísulas na ponte sobre o Rio Maquiné - RS

Fonte: Adaptado de Boldo (2008)

No caso dos reservatórios, segundo Vasconcelos (1998) as ligações entre as paredes e entre estas e o fundo devem possuir mísulas, para aumentar o grau de engastamento entre as placas, reduzir os riscos de fissuração e facilitar a aplicação da impermeabilização. As mísulas que estão nas arestas das paredes do reservatório são denominadas mísulas verticais, as mísulas que estão nas arestas das paredes do reservatório com o fundo são denominadas mísulas horizontais, como observado na Figura 10.

Figura 10 - Mísulas verticais e mísulas horizontais

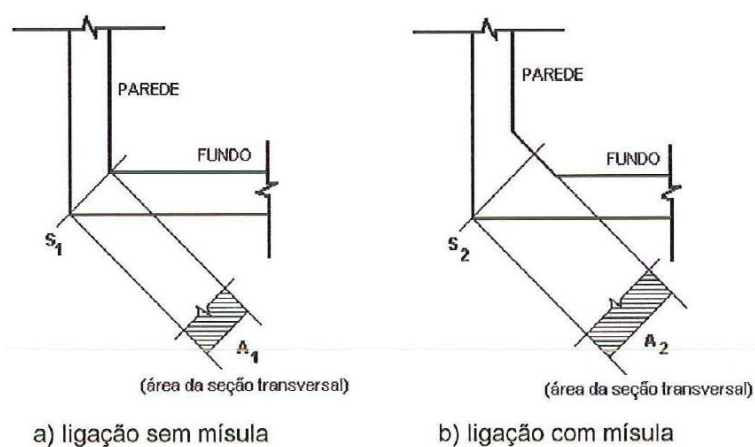


Fonte: Adaptado de Vasconcelos (1998)

De acordo com Campos (1985), o cálculo das solicitações de cada laje é realizado com a hipótese de que ela tivesse espessura constante. Somado a isso, utilizando mísulas nas arestas do reservatório, tem-se um acréscimo de rigidez das lajes nas bordas, fazendo com que os momentos fletores no centro, que são considerados positivos, decresçam, ao mesmo tempo que os momentos fletores nas bordas, negativos, cresçam.

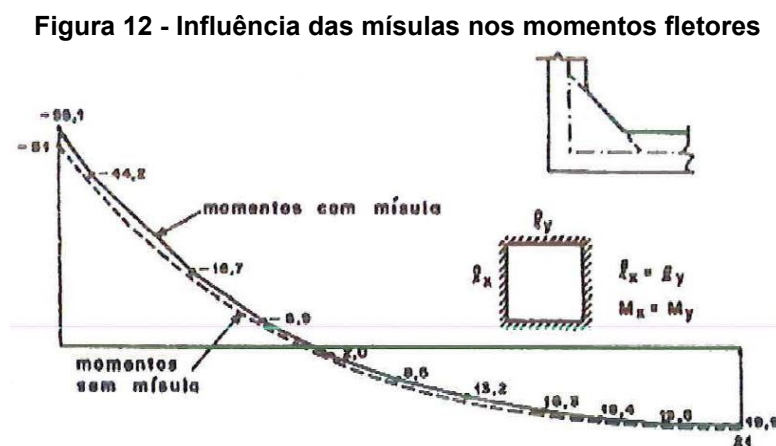
Segundo Vasconcelos (1998) o acréscimo de área nas seções transversais nas ligações (Figura 11) devido às mísulas e em consequência a diminuição das tensões, produzem o acréscimo de rigidez nas bordas das lajes.

Figura 11 - Arestas dos reservatórios com mísulas e sem mísulas



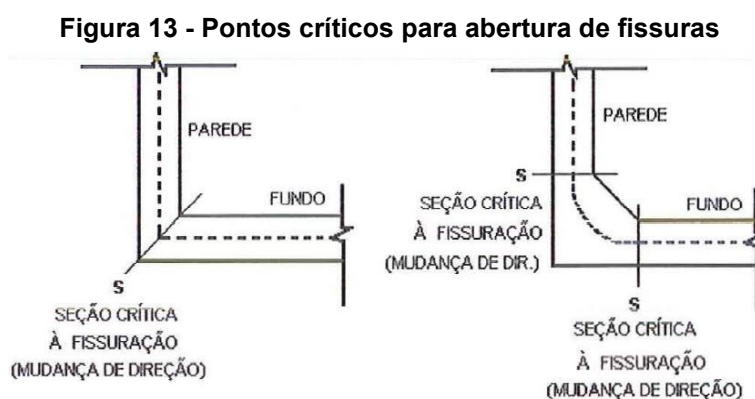
Fonte: Vasconcelos (1998)

Os momentos de engastamento nas lajes com mísulas, considerando uma submissão em ação uniforme, são maiores que os encontrados nas lajes sem mísulas, uma vez que este acréscimo é da ordem de 10%. A Figura 12 compara os dois casos em uma laje quadrada (VASCONCELOS, 1998).



Fonte: Campos (1985)

Para realizar a escolha da espessura das lajes e de suas armaduras, é muito importante, e frequentemente decisiva a análise da limitação de abertura de fissuras. Para esta análise são necessários não só o conhecimento dos momentos fletores nas seções mais desfavoráveis à fissuração, mas também os esforços normais de tração, exercidos por uma parede sobre aquelas onde se apoia. A presença da mísula acarreta que os pontos críticos à fissuração se situem, normalmente, não nas extremidades das lajes, mas sim, mais para dentro, na extremidade da mísula (Figura 13). É necessário, dessa forma, conhecer o valor do momento fletor e força normal nesta seção (VASCONCELOS, 1998).



Fonte: Vasconcelos (1998)

2.4.2 Abertura de fissuras

De acordo com Leonhardt (1978), a baixa resistência à tração do concreto é a razão pela qual as peças estruturais de concreto fissuram-se até mesmo sob baixas tensões de tração.

Segundo Vasconcelos (1998) dimensiona-se a armadura de vigas de concreto armado para atender à capacidade resistente, partindo-se da hipótese de que o concreto não colabore em nada com a tração. É importante frisar que a armadura não pode impedir a formação de fissuras: não existe uma “segurança à fissuração” (segurança contra a formação de fissuras) através da armadura. Nas estruturas de concreto, só se pode evitar fissuras quando as possíveis tensões de tração devido às ações e a efeitos de coação sejam mantidas com um valor muito pequeno ou sejam aliviadas, principalmente através de protensão.

No caso de reservatórios, nos quais é extremamente necessário garantir a estanqueidade, os limites de abertura de fissuras devem ser mais rigorosos (VASCONCELOS, 1998).

Segundo Vasconcelos (1998) muitos autores e projetistas exigem que as aberturas das fissuras nos reservatórios não fiquem maiores do que $w = 0,1$ mm, por motivo de estanqueidade, pois $w = 0,2$ mm não é nocivo, nem do ponto de vista estético, nem no perigo de corrosão do aço. Essa exigência acarreta, geralmente, forte aumento na quantidade de armadura, encarecendo a estrutura.

Santos (1984) diz que $w = 0,2$ mm é admissível. A estanqueidade do reservatório deve ser assegurada por execução cuidadosa e disposições construtivas, como, por exemplo: consistência plástica do concreto adequada, perfeito adensamento, cura bem feita, barras de armadura de pequeno diâmetro e com pequeno espaçamento, e, finalmente, a impermeabilização interna do reservatório.

Na NBR 6118 (ABNT, 2014) é necessário classificar os reservatórios de acordo com a classe de agressividade ambiental. De acordo com Corrêa e Girardi (2018) os reservatórios de concreto são classificados como CAA-IV (Classe de agressividade ambiental IV), ou seja, agressividade muito forte com risco de deterioração elevado. Devido ao reservatório acondicionar água com teor de cloro, esta classificação é a que mais se aproxima das condições apresentadas, se assemelhando em condição aos respingos de maré.

Somado a isso, na legenda da Tabela 7.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), recomenda-se para o cobrimento classificar os reservatórios como sendo CAA-IV, como é possível observar na Figura 14.

Figura 14 - Classe de agressividade para o cobrimento de reservatórios

- a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.
- b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.
- c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.
- d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT (2014)

Para a classe de agressividade ambiental IV, correspondente a reservatórios, a NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que a abertura de fissuras tenha o valor máximo de 0,2 mm, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	

Fonte: ABNT (2014).

2.4.3 Impermeabilização

A impermeabilização pode ser entendida como um conjunto de medidas e tecnologias capazes de garantir a proteção das edificações contra a passagem de fluidos de forma indesejável. Trata-se, portanto, de um estágio essencial na condução de um projeto visando manter a obra conservada e menos vulnerável a problemas advindos de agentes agressivos ligados às intempéries (BAUER, 2014).

A NBR 9575 (ABNT, 2010) define a impermeabilização como um conjunto de operações e técnicas construtivas (serviços), composto por uma ou mais camadas,

que tem por finalidade proteger as construções contra a ação deletéria de fluidos, vapores e da umidade. Desse modo, é preciso averiguar que o sistema de impermeabilização adotado no projeto da edificação, deve reunir os produtos e serviços adequados para garantir estanqueidade de partes específicas da construção, como por exemplo: lajes expostas, calhas, muros e pisos em contato com o solo, reservatórios e piscinas.

Atualmente, o mercado dispõe de diferentes materiais e tecnologias para atender a esse objetivo, pode ser dividida em dois grupos: as flexíveis e as rígidas. A escolha de cada grupo vai depender da análise criteriosa das características de instabilidade, de exposição a cargas e às intempéries de cada local (SALGADO, 2014).

A elasticidade da impermeabilização flexível permite que sejam usados em áreas sujeitas a movimentações, vibrações, insolações, variações térmicas e de umidade (dilatações e contrações). Por isso, são recomendadas para impermeabilizações em lajes térreas e de cobertura, banheiros, cozinhas, terraços e reservatórios elevados (HUSSEIN, 2013).

A impermeabilização rígida é menos resistente a vibrações e movimentos, sua aplicação é recomendada para as partes mais estáveis e menos propensas a trincas e fissuras da edificação, como fundações, pisos internos, contenções e piscinas enterradas (HUSSEIN, 2013).

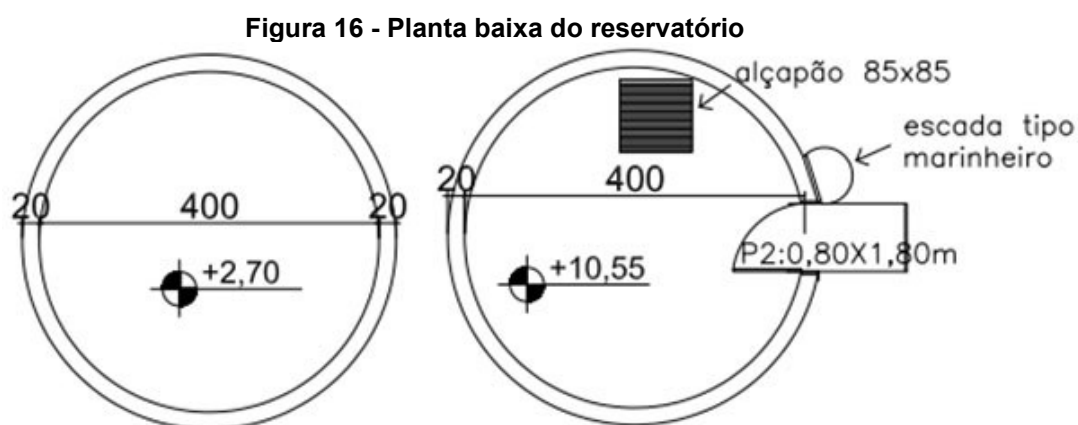
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O reservatório analisado trata-se de um reservatório de distribuição, o qual tem a finalidade de promover a regularização da vazão entre a adutora e a rede de distribuição, sendo dessa forma essencial para o abastecimento público da cidade.

Para obter as dimensões do reservatório é necessário conhecer a população que irá ser atendida por este. No presente trabalho foi utilizado como base a população do bairro Vila Becker no município de Toledo no ano de 2015, SMAS (2015) apresenta a população de Toledo dividida por bairros, a Vila Becker possuía 1108 habitantes neste ano.

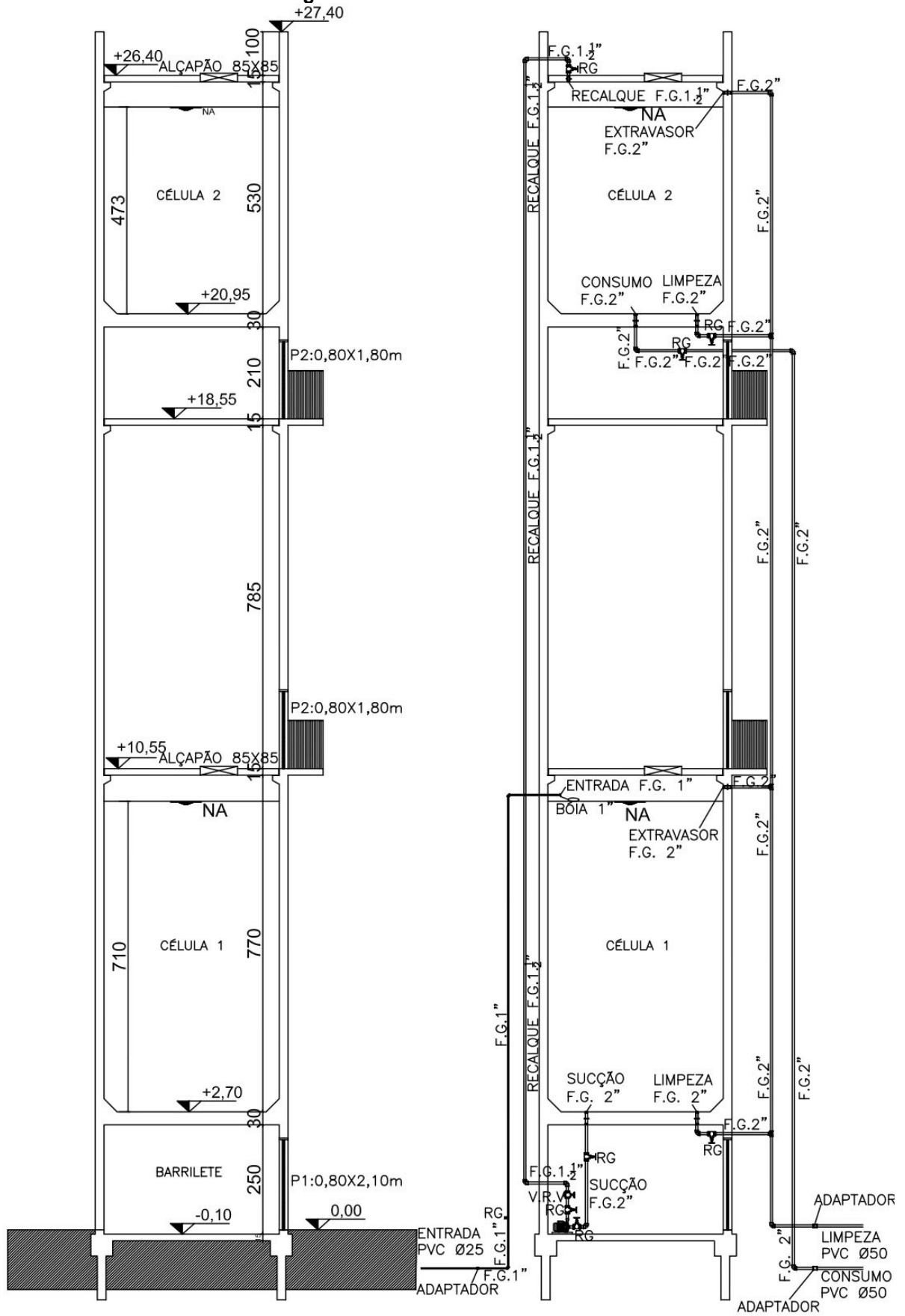
Realizando-se um dimensionamento básico para a população de 1108 habitantes, o reservatório cilíndrico necessário deve ter 148,5 m³ de volume. O processo de dimensionamento seguiu as práticas da norma NBR 12217 (ABNT, 2014), com algumas modificações. Utilizando um coeficiente k1 de 1,2 e um coeficiente k2 de 1,5, o consumo de 200 l/hab*dia, e majorando em 1,1 para consideração de reserva de incêndio foi possível chegar no volume supracitado, o qual foi subdividido em 60% para a célula 1 e 40% para a célula 2.

A Figura 16 apresenta a planta baixa da laje de fundo e da laje de tampa da célula 1, as mesmas dimensões são consideradas na célula 2. A Figura 17 apresenta a fôrma em corte do reservatório, e um corte com as tubulações do reservatório. As lajes de fundo de ambas as células contendo água foram consideradas como engastadas, assim como a laje de base do reservatório. Todas as demais lajes foram consideradas articuladas, dessa forma para essa hipótese ser válida as lajes devem ser executadas apoiadas sobre uma mísula.



Fonte: Autor (2021)

Figura 17 - Reservatório em cortes

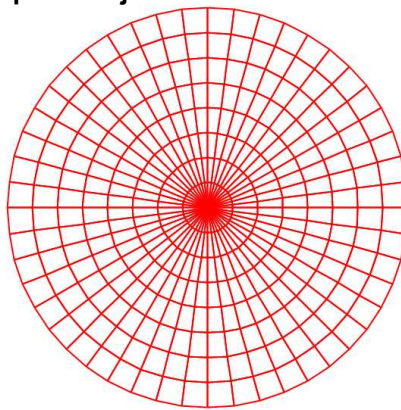


Fonte: Autor (2021)

O método analítico de cálculo foi subdividido na utilização dos ábacos de Hangan e Soare (1959) para o cálculo dos esforços internos da parede do reservatório, e na utilização das equações de Timoshenko e Woinowosky-Krieger (1959) para obter os esforços internos da laje de fundo do reservatório. Os ábacos de Hangan e Soare (1959) retornam valores, e empregando-os nas equações já citadas nesse trabalho (item 2.3.4) obtém-se os esforços internos da parede do reservatório.

Para a utilização do método computacional no programa SAP 2000 é necessário definir os tamanhos de malha (o que influencia na precisão dos resultados), realizar a modelagem do reservatório, a modelagem das restrições, realizar também análises de convergência, para no final obter os esforços. Para este trabalho foram utilizados 5 tamanhos diferentes de elementos para a análise de convergência dos resultados, malha com elementos de 25 cm, 20 cm, 15 cm, 10 cm, e 5 cm. Os elementos dessas malhas serão quadriláteros irregulares, tendo aproximadamente essas dimensões citadas na região de borda das lajes, diminuindo seus tamanhos para a parte central das lajes, como demonstra a Figura 18.

Figura 18 - Exemplo de laje com malha de 384 elementos



Fonte: Autor (2021)

Após a obtenção dos esforços nos métodos analítico e computacional foi realizado a comparação entre os mesmos, para verificar as potencialidades, vantagens e desvantagens de cada método, para este problema específico de um reservatório cilíndrico elevado. Não foi realizada a comparação dos esforços na laje que está em contato com o solo nesse reservatório.

Para ambos os métodos de cálculo nesse trabalho foi considerado para peso específico da água 10 kN/m^3 , para peso específico do concreto armado 25 kN/m^3 .

Para a determinação do módulo de elasticidade foi consultado a NBR 6118 (ABNT, 2014), que estabelece que os reservatórios de concreto são classificados como CAA-IV (Classe de agressividade ambiental IV), determina também que para CAA-IV o concreto deve possuir resistência característica de 40 MPa. Ao considerar granito como agregado graúdo a Tabela 8.1 dessa norma determina que para concreto com resistência característica de 40 MPa o módulo de elasticidade secante E_{cs} deve ser de 32 GPa, sendo esse valor considerado para esse trabalho.

Para a determinação do coeficiente de Poisson foi verificado a NBR 6118 (ABNT, 2014) que admite para o concreto um coeficiente de Poisson relativo às deformações elásticas igual a 0,2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Método analítico

4.1.1 Cálculo de esforços da laje de fundo da célula 1

Para as ações no cálculo dos esforços na laje de fundo dessa célula do reservatório foram utilizadas as seguintes considerações:

$$q_1 = (7,1) * (10) = 71 \text{ kN/m}^2 \quad (19)$$

$$q_2 = 1 \text{ kN/m}^2 \quad (20)$$

$$q_3 = (0,3) * (25) = 7,5 \text{ kN/m}^2 \quad (21)$$

onde:

q_1 : pressão da água na laje de fundo

q_2 : carregamento de impermeabilização

q_3 : peso próprio da laje

As ações totais atuantes nessas lajes são calculadas da maneira que segue:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (22)$$

$$q = 71 + 1 + 7,5 = 79,5 \text{ kN/m}^2 \quad (23)$$

Dessa forma, utilizando os valores citados na Equação (8) que calcula momento no centro da laje obtém-se:

$$M_r = M_t = \frac{(79,5) * (2,1^2)}{16} (1 + 0,2) = 26,29 \text{ kN} * \text{m/m} \quad (24)$$

Para os momentos na borda da laje, utilizando as equações (6) e (7), obtém-se:

$$M_r = \frac{-(79,5) * (2,1^2)}{8} = -43,82 \text{ kN} * \text{m/m} \quad (25)$$

$$M_t = \frac{-(0,2) * (79,5) * (2,1^2)}{8} = -8,76 \text{ kN} * \text{m/m} \quad (26)$$

4.1.2 Cálculo de esforços da laje de fundo da célula 2

No cálculo dos esforços da laje de fundo dessa célula do reservatório foram consideradas todas as ações iguais na célula 1, com exceção a pressão de água, que é a seguinte:

$$q_1 = (4,73) * (10) = 47,3 \text{ kN/m}^2 \quad (27)$$

Assim, o somatório de ações atuantes no reservatório 2 é o que segue:

$$q = 47,3 + 1 + 7,5 = 55,8 \text{ kN/m}^2 \quad (28)$$

Logo, para o momento no centro da laje obtém-se:

$$M_r = M_t = \frac{(55,8) * (2,1^2)}{16} (1 + 0,2) = 18,46 \text{ kN} * \text{m/m} \quad (29)$$

Os momentos na borda da laje são os seguintes:

$$M_r = \frac{-(55,8) * (2,1^2)}{8} = -30,76 \text{ kN} * \text{m/m} \quad (30)$$

$$M_t = \frac{-(0,2) * (55,8) * (2,1^2)}{8} = -6,15 \text{ kN} * \text{m/m} \quad (31)$$

4.1.3 Cálculo de esforços nas lajes de tampa

As lajes de tampa consideradas articuladas são calculadas com a Equação (3), de acordo com a NBR 6120 (ABNT, 2019) o carregamento de manutenção para

lajes com acesso deve ser de 1 kN/m². Dessa forma, as ações atuantes nessas lajes são as seguintes:

$$q_1 = 1 \text{ kN/m}^2 \quad (32)$$

$$q_2 = (0,15) * (25) = 3,75 \text{ kN/m}^2 \quad (33)$$

Onde o carregamento total é o que segue:

$$q = q_1 + q_2 \quad (34)$$

$$q = 1 + 3,75 = 4,75 \text{ kN/m}^2 \quad (35)$$

Assim, para o momento no centro da laje, com auxílio da Equação (3) obtém-se:

$$M_r = M_t = \frac{(4,75) * (2,1^2)}{16} (3 + 0,2) = 4,19 \text{ kN/m}^2 \quad (36)$$

4.1.4 Cálculo de esforços na parede da célula 1

De acordo com a geometria do reservatório foi possível calcular os esforços na parede utilizando os ábacos de Hangan e Soare (1959), essa análise foi realizada considerando que os esforços atuando na célula 1 não influenciam nos esforços da célula 2, devido a distância entre essas células ser considerável.

Primeiramente é necessário calcular a os valores de h/h' e βH , que são os seguintes:

$$\frac{h}{h'} = \frac{0,20}{0,30} = 0,67 \quad (37)$$

$$\beta H = 1,307 * \frac{7,70}{\sqrt{2,10 * 0,2}} = 15,53 \quad (38)$$

Utilizando esses valores nos ábacos A à F é possível calcular os esforços nessa parede:

$$M_0 = K * \gamma * H^3 = 0,0019 * 10 * (7,7^3) = 8,8563 \text{ kN} * \text{m}/\text{m} \quad (39)$$

$$y_0 = K_0 * H = 0,047 * 7,7 = 0,3619 \text{ m} \quad (40)$$

$$M' = -K' * \gamma * H^3 = -0,00046 * 10 * (7,7^3) = -2,1001 \text{ kN} * \text{m}/\text{m} \quad (41)$$

$$y_1 = K_1 * H = 0,097 * 7,7 = 0,7469 \text{ m} \quad (42)$$

$$N_{\theta\text{máx}} = K'' * \gamma * r * H = 0,868 * 10 * 2,1 * 7,7 = 140,3556 \text{ kN} \quad (43)$$

$$y_2 = K_2 * H = 0,165 * 7,7 = 1,2705 \text{ m} \quad (44)$$

4.1.5 Cálculo de esforços na parede da célula 2

Para a célula 2 do reservatório os valores de h/h' e βH , são os seguintes:

$$\frac{h}{h'} = \frac{0,20}{0,30} = 0,67 \quad (45)$$

$$\beta H = 1,307 * \frac{5,30}{\sqrt{2,10 * 0,2}} = 10,69 \quad (46)$$

Empregando esses valores nos ábacos A à F obtém-se os esforços na parede dessa célula:

$$M_0 = K * \gamma * H^3 = 0,0039 * 10 * (5,3^3) = 5,9059 \text{ kN} * \text{m}/\text{m} \quad (47)$$

$$y_0 = K_0 * H = 0,067 * 5,3 = 0,3551 \text{ m} \quad (48)$$

$$M' = -K' * \gamma * H^3 = -0,0009 * 10 * (5,3^3) = -1,3399 \text{ kN} * \text{m}/\text{m} \quad (49)$$

$$y_1 = K_1 * H = 0,14 * 5,3 = 0,7420 \text{ m} \quad (50)$$

$$N_{\theta\text{máx}} = K'' * \gamma * r * H = 0,788 * 10 * 2,1 * 5,3 = 87,7044 \text{ kN} \quad (51)$$

$$y_2 = K_2 * H = 0,23 * 5,3 = 1,2190 \text{ m} \quad (52)$$

4.2 Método computacional

4.2.1 Análises de convergência para as malhas

Com o intuito de verificar a qualidade de malha modelada foram efetuadas análises de convergência, dessa forma, garantindo que os resultados apresentados pelo programa são precisos, simulando de forma satisfatória a realidade.

As análises foram feitas para as lajes isoladas engastadas e as articuladas, comparando deslocamentos no centro dessas lajes, obtidos no programa, com o deslocamento calculado do cálculo analítico. Essas lajes foram modeladas em um modelo contendo somente as mesmas, com apoios nas extremidades delas, sem a presença das paredes, de modo que as paredes do reservatório não influenciem nessa análise.

É necessário ressaltar que não se poderia fazer uma análise de convergência para a estrutura inteira pois não existe solução analítica para o problema completo.

Para as lajes engastadas foi realizado a análise da laje de fundo da célula 2, no método analítico o cálculo da rigidez à flexão dessa laje é realizado com a Equação (9):

$$D = \frac{(32000)(300^3)}{12(1 - 0,2^2)} = 7,5 * 10^{10} N * mm \quad (53)$$

O deslocamento no centro da laje de fundo da célula 2 é calculado com a Equação (10):

$$w_{máx} = \frac{(0,0558) * (2100^4)}{64(7,5 * 10^{10})} = 0,2261 mm \quad (54)$$

No programa foram modeladas as 5 malhas utilizadas nessa análise, a Tabela 1 apresenta os valores de deslocamentos obtidos para cada malha, comparando com o deslocamento do método analítico.

Tabela 1 - Verificação para as lajes engastadas

Malha	Nº de elementos	Deslocamento SAP (mm)	Deslocamento Analítico (mm)
Malha 25 cm	384	0,2283	0,2261
Malha 20 cm	792	0,2273	0,2261
Malha 15 cm	1260	0,2268	0,2261
Malha 10 cm	2520	0,2264	0,2261
Malha 5 cm	10080	0,2262	0,2261

Fonte: Autor (2021)

No caso das lajes articuladas, o deslocamento no centro delas pode ser calculado com a Equação (11), sendo a rigidez à flexão dessas lajes de igual valor ao das lajes engastadas:

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{(5 + 0,2)(0,00475)(2100^4)}{64(1 + 0,2)(7,5 * 10^{10})} = 0,6672 \text{ mm} \quad (55)$$

Após o cálculo do deslocamento com o método analítico, foi realizada a modelagem da laje articulada no programa, com os tamanhos de malha supracitados, a Tabela 2 apresenta os resultados.

Tabela 2 - Verificação para as lajes articuladas

Malha	Nº de elementos	Deslocamento SAP (mm)	Deslocamento Analítico (mm)
Malha 25 cm	384	0,6660	0,6672
Malha 20 cm	792	0,6666	0,6672
Malha 15 cm	1260	0,6668	0,6672
Malha 10 cm	2520	0,6670	0,6672
Malha 5 cm	10080	0,6671	0,6672

Fonte: Autor (2021)

Nas Tabelas 1 e 2 é possível observar que ao aumentar o número de elementos a variação dos deslocamentos apresentados diminui, ao passo que caso aumentar o número de elementos além dos apresentados pelas tabelas, esses deslocamentos serão constantes. Somado a isso, as tabelas demonstram que ao aumentar o número de elementos os deslocamentos se aproximam muito do método analítico.

Para analisar os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 é válido calcular o erro relativo dos deslocamentos, que é calculado com a seguinte equação:

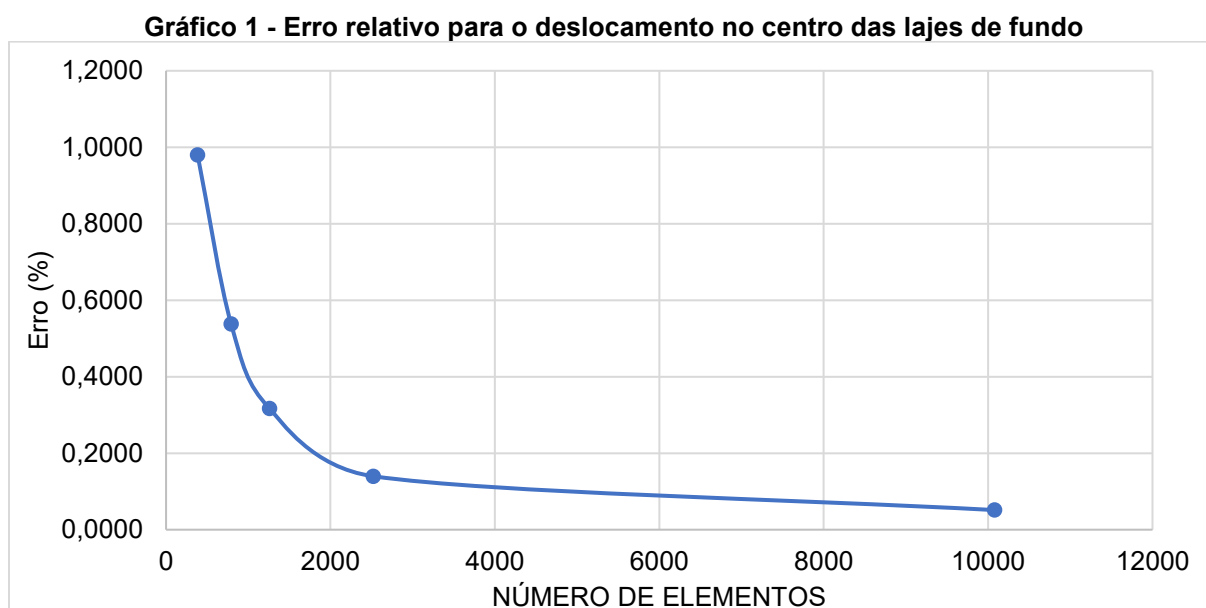
$$Erro\ relativo = \left(\frac{\delta_{MEF} - \delta_{analítico}}{\delta_{analítico}} \right) * 100 \quad (56)$$

onde:

δ_{MEF} : deslocamento calculado pelo MEF

$\delta_{analítico}$: deslocamento calculado pelo método analítico

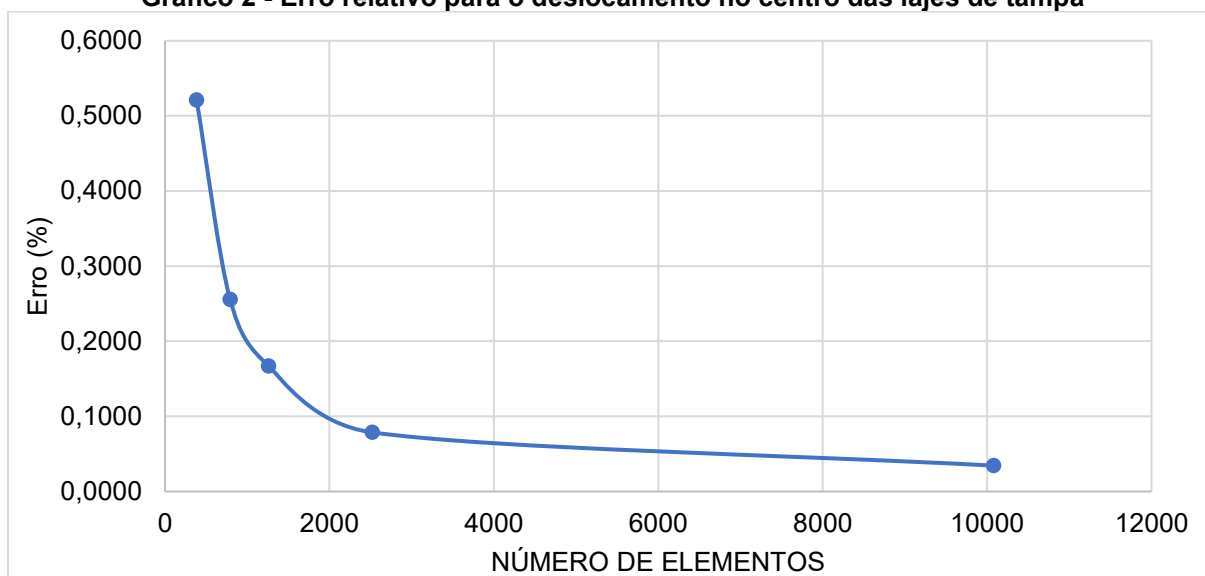
O erro relativo calculado com a Equação (56) retorna valores em porcentagem. O Gráfico 1 é possível observar o erro relativo com relação ao cálculo analítico, para as lajes engastadas, sendo possível verificar que todas as malhas modeladas obtiveram um erro relativo menor que 1%.



Fonte: Autor (2021)

O Gráfico 2 apresenta o erro relativo para as lajes articuladas, sendo possível observar que todas as malhas modeladas apresentam um erro relativo menor que 0,6% para o deslocamento no centro dessa laje.

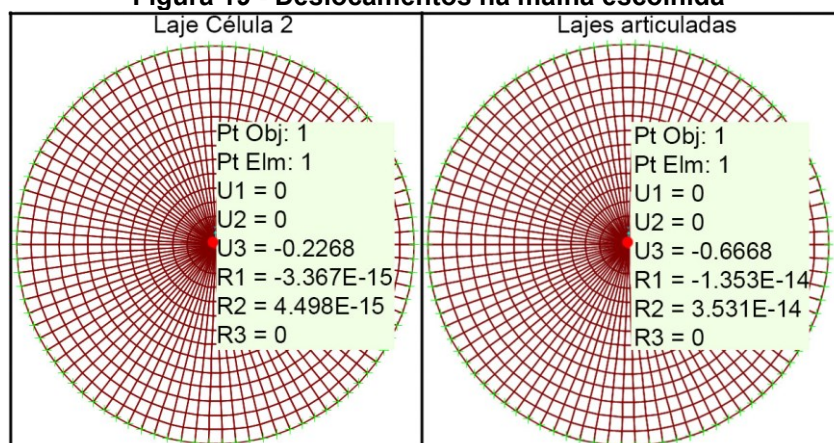
Gráfico 2 - Erro relativo para o deslocamento no centro das lajes de tampa



Fonte: Autor (2021)

Dessa forma, foi considerado a malha de 15 cm como a de suficiente precisão para a comparação com o método analítico, possuindo 1260 elementos, 0,32% de erro relativo para as lajes engastadas, e 0,17% de erro relativo para as lajes articuladas. A Figura 19 apresenta os deslocamentos obtidos no programa para essa malha.

Figura 19 - Deslocamentos na malha escolhida



Fonte: Autor (2021)

Devido que na análise de convergência foram modeladas somente as lajes (sem as paredes), essa malha foi a escolhida pois possui erros relativos inferiores a 0,4%, visto que caso fosse escolhido as outras malhas com maior número de

elementos o tempo computacional necessário seria consideravelmente maior, para a modelagem do reservatório por completo.

4.2.2 Comparação entre MEF e cálculo analítico

De acordo com as dimensões do reservatório supracitadas, a Figura 20 demonstra o reservatório modelado no programa, utilizando a malha de 15 cm. Para as lajes foi considerado no programa como as mesmas sendo elemento de placa, já para a parede do reservatório a mesma foi considerada como elemento de casca, com o intuito de utilizar as mesmas classes estruturais utilizadas para o método analítico.

Figura 20 - Reservatório modelado



Fonte: Autor (2021)

Durante a verificação inicial dos resultados apresentados pelo programa, foi observado que aumentando a espessura da parede do reservatório os resultados se aproximam mais do método analítico. Assim, nessa seção será realizada a análise para a situação originalmente proposta (reservatório com parede de 20 cm), mas também será utilizada uma hipótese do mesmo reservatório com parede de 35 cm, com o intuito de analisar o comportamento do modelo.

A Tabela 3 apresenta os valores calculados pelo MEF, juntamente com os valores do método analítico, e a diferença percentual entre os métodos, para os esforços na parede do reservatório.

Tabela 3 - Esforços na parede (Parede de 20 cm)

Esforço	Método Analítico	MEF	Método Analítico/MEF	Diferença relativa
M_0 Célula 1 (kN*m/m)	8,8563	14,3979	61,51%	-38,49%
M' Célula 1 (kN*m/m)	-2,1001	-2,2408	93,72%	-6,28%
$N_{\theta_{m\acute{a}x}}$ Célula 1 (kN)	140,3556	121,6946	115,33%	15,33%
M_0 Célula 2 (kN*m/m)	5,9059	9,5797	61,65%	-38,35%
M' Célula 2 (kN*m/m)	-1,3399	-1,3820	96,95%	-3,05%
$N_{\theta_{m\acute{a}x}}$ Célula 2 (kN)	87,7044	69,7451	125,75%	25,75%

Fonte: Autor (2021)

É possível verificar que para essa configuração a maior discrepância entre os métodos é com relação ao momento no engaste da parede com a laje de fundo de cada célula, sendo os demais esforços apresentando valores muito próximos para os dois métodos.

Na Tabela 4 é possível observar que ao aumentar a espessura do reservatório para 35 cm, o momento no engaste se aproxima mais entre os métodos.

Tabela 4 - Esforços na parede (Parede de 35 cm)

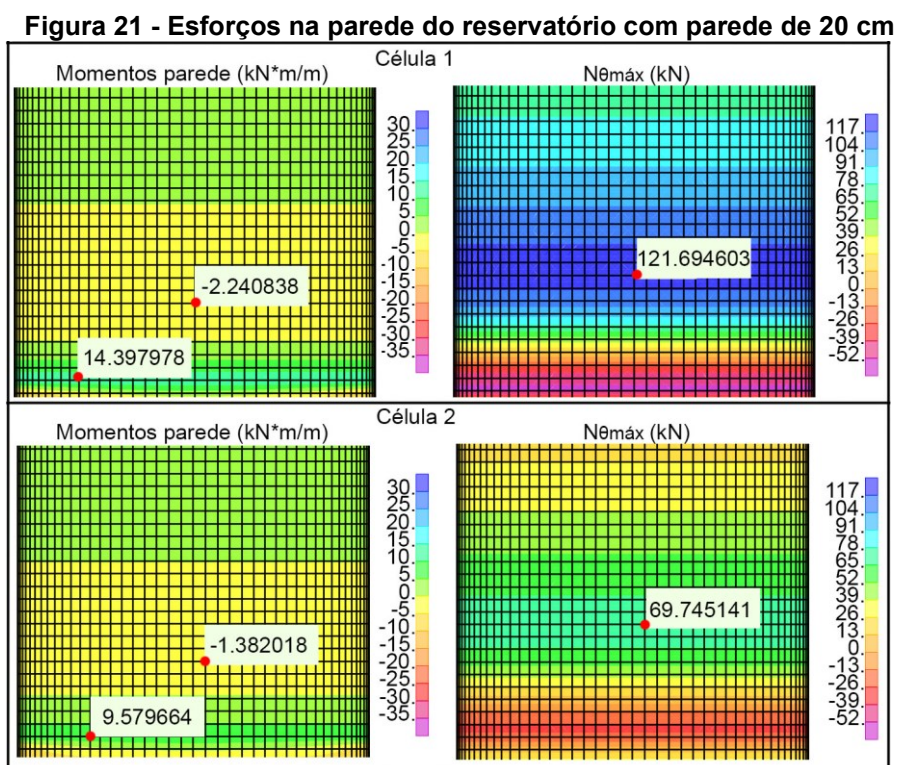
Esforço	Método Analítico	MEF	Método Analítico/MEF	Diferença relativa
M_0 Célula 1 (kN*m/m)	15,1541	19,5796	77,40%	-22,60%
M' Célula 1 (kN*m/m)	-3,6523	-2,9802	122,55%	22,55%
$N_{\theta_{m\acute{a}x}}$ Célula 1 (kN)	130,9770	111,4906	117,48%	17,48%
M_0 Célula 2 (kN*m/m)	9,9909	12,4936	79,97%	-20,03%
M' Célula 2 (kN*m/m)	-2,6053	-1,7389	149,83%	49,83%
$N_{\theta_{m\acute{a}x}}$ Célula 2 (kN)	82,3620	60,8660	135,32%	35,32%

Fonte: Autor (2021)

Ao aumentar a espessura da parede a mesma adquire rigidez suficiente para assumir comportamento como engaste. Somado a isso, nessa configuração todos os demais esforços apresentam valores superiores no método analítico, com relação ao MEF.

É importante destacar que os esforços calculados para o método analítico considerando a parede do reservatório de 35 cm foram calculados de forma similar ao cálculo apresentado na seção 4.1 desse trabalho.

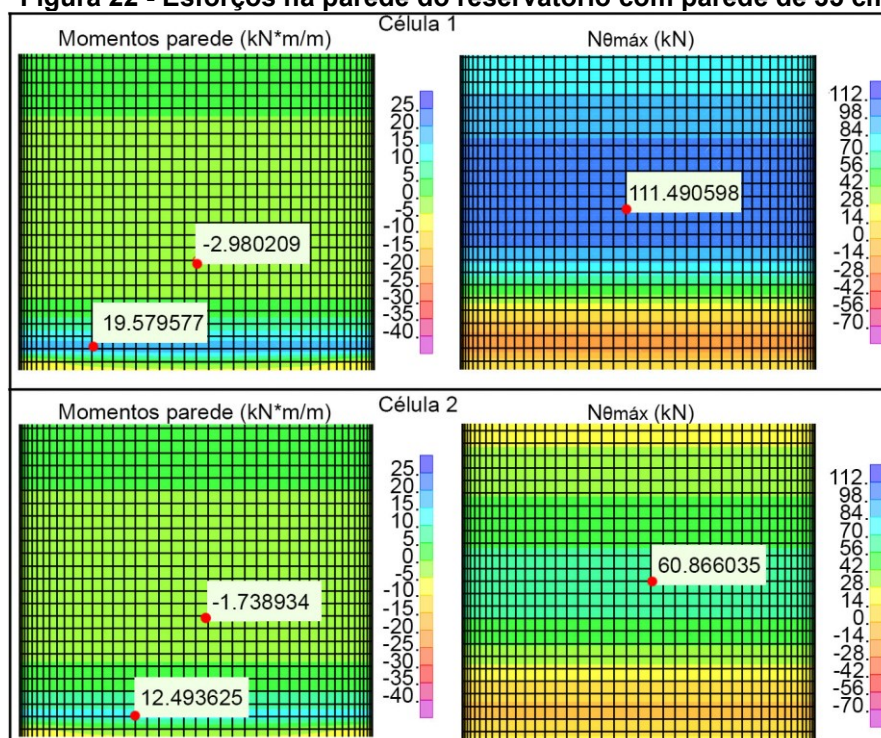
A Figura 21 apresenta os resultados obtidos com o programa SAP2000, para os esforços na parede para cada célula do reservatório, considerando o reservatório com parede de 20 cm.



Fonte: Autor (2021)

A Figura 22 apresenta os resultados de esforços de parede para cada célula do reservatório, obtidos com o programa SAP2000, sendo a parede de 35 cm.

Figura 22 - Esforços na parede do reservatório com parede de 35 cm



Fonte: Autor (2021)

Observa-se que no primeiro terço de cada célula (região próxima ao engaste) tem-se esforços maiores de momento que nos demais trechos.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre métodos para os esforços nas lajes do reservatório.

Tabela 5 - Esforços nas lajes (Parede de 20 cm)

Esforço	Método Analítico	MEF	Método Analítico/MEF	Diferença relativa
$M_r = M_t$ Centro Célula 1 (kN*m/m)	26,2946	34,1314	77,04%	-22,96%
M_r Borda Célula 1 (kN*m/m)	-43,8244	-37,5363	116,75%	16,75%
M_t Borda Célula 1 (kN*m/m)	-8,7649	-1,5089	580,88%	480,88%
$M_r = M_t$ Centro Célula 2 (kN*m/m)	18,4559	24,0588	76,71%	-23,29%
M_r Borda Célula 2 (kN*m/m)	-30,7598	-26,2438	117,21%	17,21%
M_t Borda Célula 2 (kN*m/m)	-6,1520	-0,9466	649,90%	549,90%
M lajes articuladas (kN*m/m)	4,1895	4,3200	96,98%	-3,02%

Fonte: Autor (2021)

Ao observar a Tabela 5 é possível verificar que com exceção dos momentos no centro das lajes circulares engastadas e articuladas, todos os demais esforços apresentaram valores superiores no método analítico em relação ao MEF. Além disso,

os momentos tangenciais nas lajes engastadas apresentaram significativa discrepância entre os dois métodos.

Ao aumentar a espessura de parede do reservatório, há alterações nos esforços das lajes, os quais estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Esforços nas lajes (Parede de 35 cm)

Esforço	Método Analítico	MEF	Método Analítico/MEF	Diferença relativa
$M_r = M_t$ Centro Célula 1 (kN*m/m)	26,2946	28,5965	91,95%	-8,05%
M_r Borda Célula 1 (kN*m/m)	-43,8244	-43,0711	101,75%	1,75%
M_t Borda Célula 1 (kN*m/m)	-8,7649	-7,0438	124,43%	24,43%
$M_r = M_t$ Centro Célula 2 (kN*m/m)	18,4559	20,1159	91,75%	-8,25%
M_r Borda Célula 2 (kN*m/m)	-30,7598	-30,1866	101,90%	1,90%
M_t Borda Célula 2 (kN*m/m)	-6,1520	-4,8895	125,82%	25,82%
M lajes articuladas (kN*m/m)	4,1895	4,3200	96,98%	-3,02%

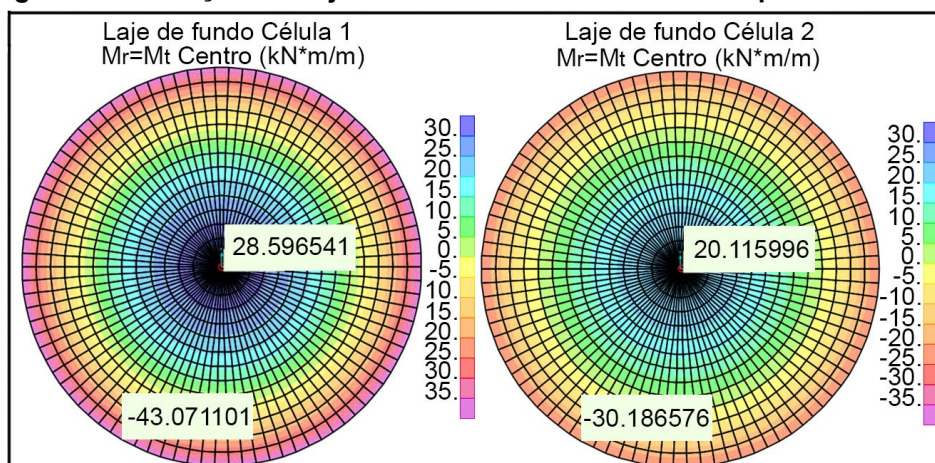
Fonte: Autor (2021)

Ao considerar o modelo com a parede de 35 cm, é possível observar que os momentos centrais nas lajes se aproximam mais entre os métodos, assim como os demais esforços, sendo que os momentos tangenciais são os que apresentam uma mudança maior ao aumentar a espessura de parede do reservatório.

O aumento de espessura da parede corresponde ao aumento da rigidez da mesma, com o aumento de rigidez da parede ocorre uma melhor simulação do comportamento de engastamento da vinculação da parede com a laje de fundo. Dessa forma, espessuras menores não garantem funcionamento como engaste, o que exige cuidado por parte do projetista para a análise destas estruturas.

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos com o programa SAP2000, para os esforços nas lajes de fundo das células 1 e 2, ao considerar o reservatório com parede de 20 cm de espessura.

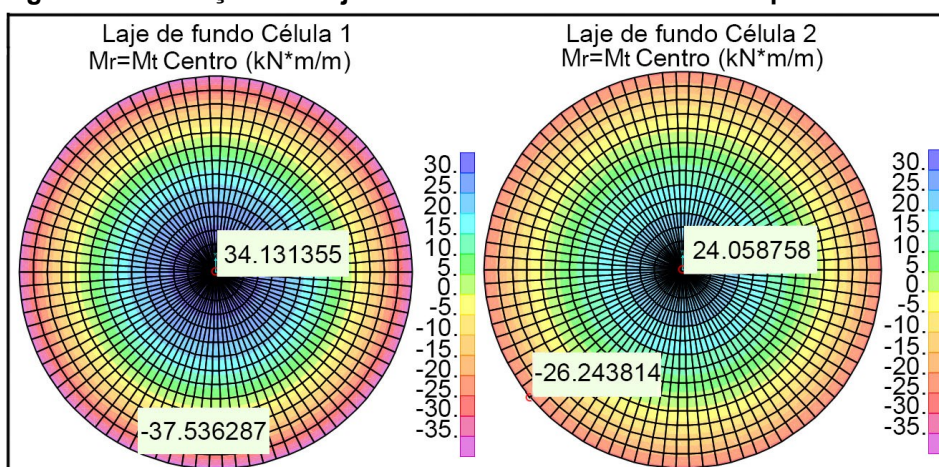
Figura 23 - Esforços nas lajes de fundo no reservatório com parede de 20 cm



Fonte: Autor (2021)

Os esforços para as lajes de fundo das células 1 e 2 considerando o reservatório com parede de 35 cm estão dispostos na Figura 24, os mesmos foram obtidos com o programa SAP2000.

Figura 24 - Esforços nas lajes de fundo no reservatório com parede de 35 cm



Fonte: Autor (2021)

Analisando as respostas é possível afirmar que o projeto usando os valores fornecidos pelo método analítico ao retornar valores de esforços superiores ao MEF está do lado da segurança. Ocorreu em alguns casos o método analítico apresentar valores inferiores ao MEF, porém, vale ressaltar que esta é uma análise linear elástica e que os fatores de segurança fazem o papel de ajuste nestas situações.

Destaca-se que com a utilização do MEF as estruturas tendem a ter um menor custo financeiro de execução, sendo esse um fator importante para a utilização do

MEF nos dias atuais. Ademais, o MEF inclui a modelagem da estrutura como um todo, fornecendo a análise de um modelo mais próximo da realidade.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizada uma análise estrutural de um reservatório cilíndrico elevado, utilizando métodos analítico e computacional, realizando a comparação entre os resultados desses métodos.

Ao utilizar o MEF é necessário garantir que a malha represente adequadamente o comportamento da estrutura, para isso é necessário realizar análises de convergência. É importante salientar que para a estrutura como um todo não existem soluções analíticas, dessa forma, no caso deste trabalho foi utilizado como representativo o valor dos deslocamentos das lajes, que tem uma solução analítica conhecida.

Para outros estudos seria interessante estudar o gradiente de tensões na interface parede-laje de fundo onde provavelmente seria necessário ajustes na malha para garantir uma adequada modelagem da estrutura. Somado a isso, existem metodologias próprias do MEF para garantir um valor determinado de erro, como a metodologia de cálculo da norma energética do erro, porém, essas metodologias fogem do escopo deste trabalho, sendo esse um trabalho de graduação.

Na análise comparativa entre os métodos é possível verificar que em todas as situações apresentadas os esforços M_0 na parede do reservatório e $M_r = M_t$ no centro das lajes de fundo apresentam valores inferiores no método analítico em relação ao MEF, assim como o momento no centro das lajes articuladas.

Os esforços $N_{\theta máx}$ na parede do reservatório, M_r e M_t nas bordas das lajes de fundo apresentam valores superiores no método analítico com relação ao MEF, em todas as situações apresentadas. Já o momento M' apresentou valores inferiores no método analítico com relação ao MEF na situação em que o reservatório possui parede de 20 cm, ao aumentar a espessura da parede do reservatório para 35 cm o momento M' obtido com o método analítico é superior ao obtido com o MEF.

Dessa forma, é importante destacar que quer seja utilizando métodos analíticos com auxílio de ábacos, ou o Método dos Elementos Finitos, o processo de cálculo deve ser realizado de maneira consciente pelo engenheiro, pois sua responsabilidade é muito grande ao projetar obras importantes para as pessoas. No caso específico de um reservatório com as dimensões descritas nesse trabalho é considerável o número de pessoas atingidas por um eventual erro de projeto.

Nos dias atuais, é possível evidenciar que ao utilizar Método dos Elementos Finitos chega-se a resultados precisos, devido ao fato do processo de cálculo ser mais refinado do que em métodos surgidos anteriormente. Porém, ao utilizar um programa computacional com o MEF embarcado, o mesmo não deve ser utilizado de maneira submissa, devendo ser necessário realizar uma análise criteriosa dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 9575 - Impermeabilização: seleção e projeto**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 12217 – Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1994.
- ANDOLFATO, R. P. **Controle Tecnológico Básico do Concreto**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2002, p. 02-03. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/control-tecnologico-basico-do-concreto.pdf>>. Acesso em: 4 out. 2020.
- AZEVEDO, A. F. M. (2003). **Método de elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1ª Edição, p. 258.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 2**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- BOLDO, Plínio. **PONTE SOBRE O RIO MAQUINÉ**. Brasília - DF: Siscon-Consultoria de Sistemas Ltda, 2008.
- CAMPOS F.A.; GOBETTI, L.C.W.; BONILHA, N. (1985). **Reservatórios paralelepípedicos**. Porto Alegre, UFRGS. (Caderno técnico).
- CORRÊA, Patricia da Rosa Dorneles; GIRARDI, Ricardo. **Análise da evolução dos parâmetros de dimensionamento de reservatórios em concreto: estudo de caso**. Revista de Engenharia Civil Imed, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 52-61, 1 jul. 2018. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A.. <http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508.2018.v5i1.2197>.
- CSI - COMPUTERS AND STRUCTURES, INC (1997). **SAP2000 - Integrated Structural Analysis & Design Programa**. Berkeley, California.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário da língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2010. 2222 p. ISBN 978-85-385-4198-1.
- FILHO, C. F. M. **Notas de Aula Saneamento Básico**. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Reserv01.html>>. Acesso em 04 de outubro de 2020.
- GUERRIN, A.; LAVAUUR, R. C. **Tratado de concreto armado**. São Paulo: Hemus, s.d., v.5.

HANAI, J. B. **Reservatórios com paredes onduladas**. São Carlos: EESC-USP, 1977. Dissertação (Mestrado).

HANGAN, M.; SOARE, M. **Calcul rapide des réservoirs cylindriques**. Paris: Institut Technique Du Bâtiment Et Des Travaux Publics, 1959. (Série: Théorie et méthodes de calcul). Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics.

HUSSEIN, Jasmim Sadika Mohamed. **Levantamento de patologias causadas por infiltrações devido à falha ou ausência de impermeabilização em construções residenciais na cidade de Campo Mourão - PR**. 2013. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Coeci, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Campo Mourão, Campo Mourão, 2013.

KIRBY, R S et al. **Engineering in history**. New York: McGraw-Hill, 1956.

KUEHN, A. **Comparação entre métodos de análise estrutural pra reservatórios retangulares de concreto armado**. 221f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2002.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. (1978). **Construções de concreto**. Rio de Janeiro, Interciência. v. 1-4.

MAJUL, Julio Fernando Pacher. **Análise de Reservatórios Cilíndricos de Concreto Estrutural**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

MARCZAK, R. J. **Introdução à teoria de membranas (vasos de pressão de paredes finas)**. Porto Alegre: Universidade do Rio Grande do Sul, v. 1, n. 1, 1999.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MORAES, Jessica Canassa de; PASSALACQUA, Arnaud. **O concreto armado a partir dos projetos de Hennebique no Rio de Janeiro**. 5º Seminário Ibero-Americano de Arquitetura e Documentação, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 1-1, out. 2017.

RAMANJANEYULU, K.; GOPALAKRISHNAN, S.; APPA RAO, T.V.S.R.. Collapse loads of reinforced concrete cylindrical water tanks using limit analysis approach. **Computers & Structures**, Oxford, 1993. Elsevier BV. DOI: 10.1016/0045-7949(93)90413-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0045794993904138>>. Acesso em: 4 out. 2020.

RAMOS, J. M. G. **Análise e dimensionamento de reservatórios semi-enterrados circulares de betão armado pré-esforçado**. Porto: Universidade do Porto, 2010. Dissertação (Mestrado).

SALGADO, J. C. P. **Técnicas e práticas construtivas para edificação**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2014.

SANTOS, L.M. (1984). **Edifícios de concreto armado**. São Paulo, EPUSP. (Notas de aula).

SCHEFFER, Pedro Felipe Vergo. **Análise de estabilidade da parede de um reservatório cilíndrico de concreto armado através da abordagem cinemática da análise limite**. 2010. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SMAS. **DIAGNÓSTICO SOCIOTERRITORIAL DA POLÍTICA DE ASSISTÊNCIA SOCIAL DO MUNICÍPIO DE TOLEDO**. 2015. Disponível em: https://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/diagnostico_territorial_-_servicos_socioassistenciais_0.pdf. Acesso em: 02 abr. 2021.

TIMOSHENKO, S.; WOINOWOSKY-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells**. New York: McGraw-Hill, 1959.

THOMAZ, Eduardo Christo Silveira. **Sistema Hennebique no Brasil - 1908**. 2020. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/>. Acesso em: 02 nov. 2020.

TQS DOCS. **Reservatórios**. Disponível em: <http://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3812&language=pt-br>. Acesso em: 24 ago. 2021.

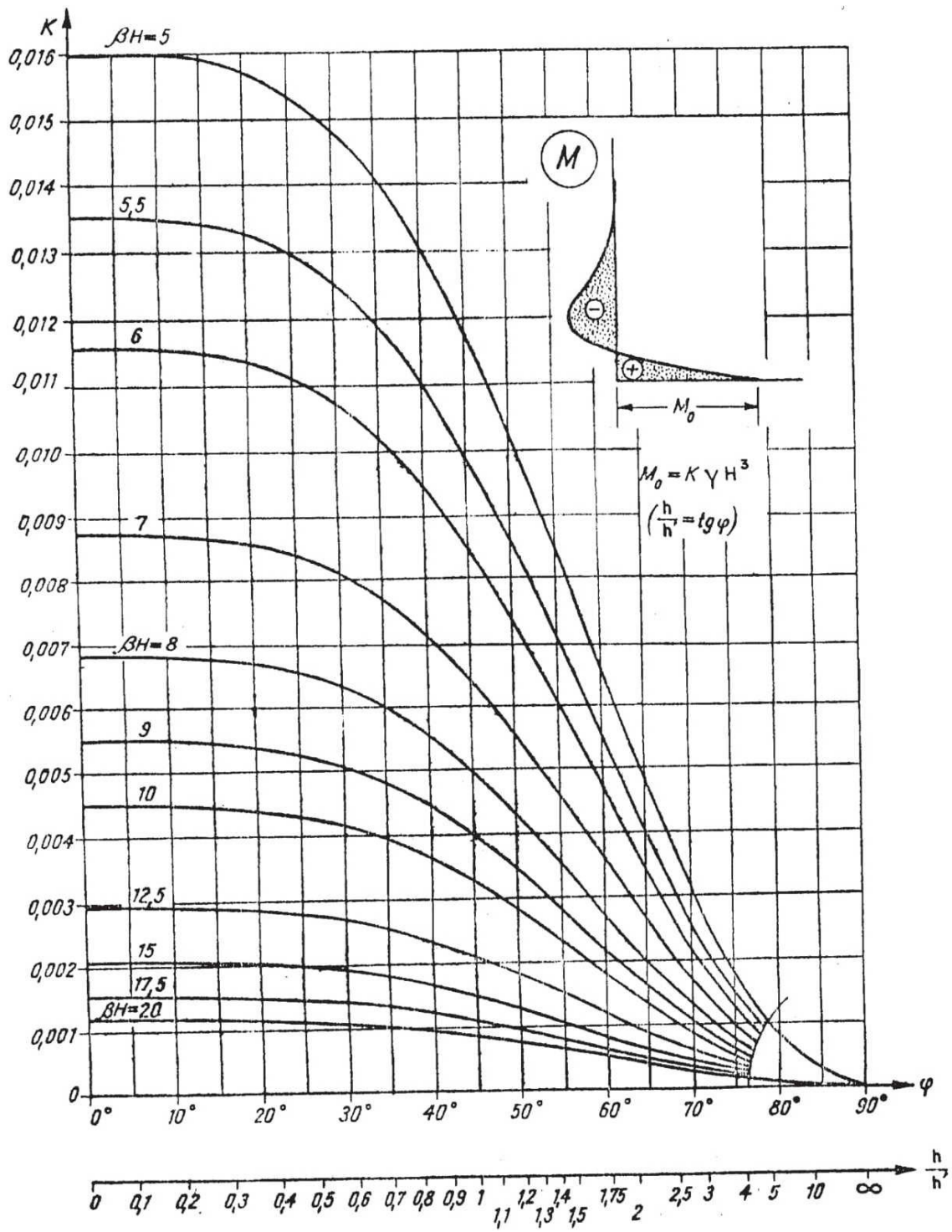
VASCONCELOS, Zelma Lamaneres. **Critérios para projetos de reservatórios paralelepípedicos elevados de concreto armado**. São Carlos, 1998. Dissertação (Mestrado).

VAZ, L. E. **Método Dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2011.

VENTURINI, W. S. **Contribuição ao dimensionamento de reservatórios cilíndricos protendidos**. São Carlos: EESC-USP, 1979. Dissertação (Mestrado).

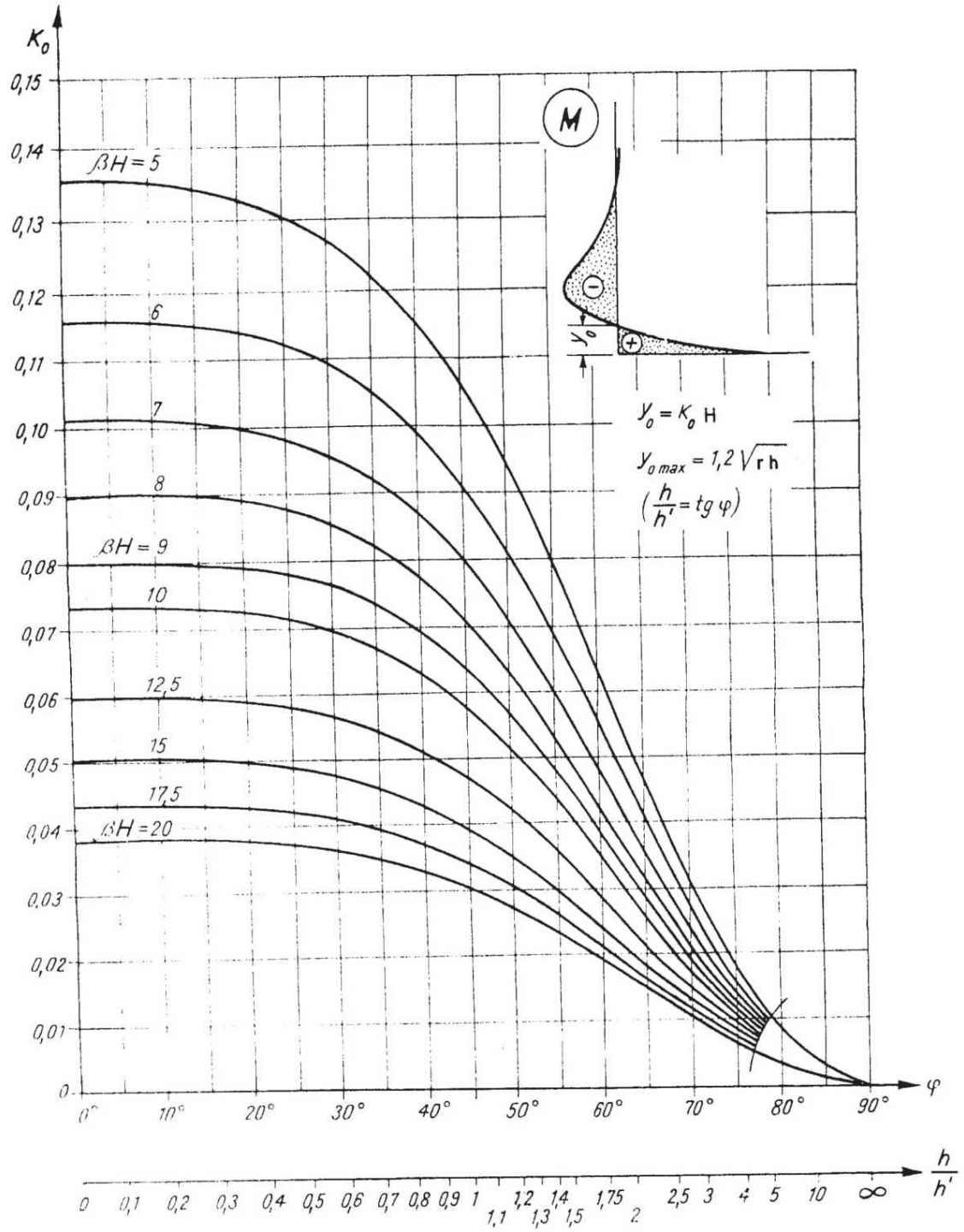
GLOBO, Rede. **O Rio tremeu**: 17 de julho de 1995. 1995. Disponível em: <http://memoria.oglobo.globo.com/jornalismo/reportagens/o-rio-tremeu-9000849>. Acesso em: 04 out. 2020.

ANEXO A - Ábaco para determinar o momento M_0



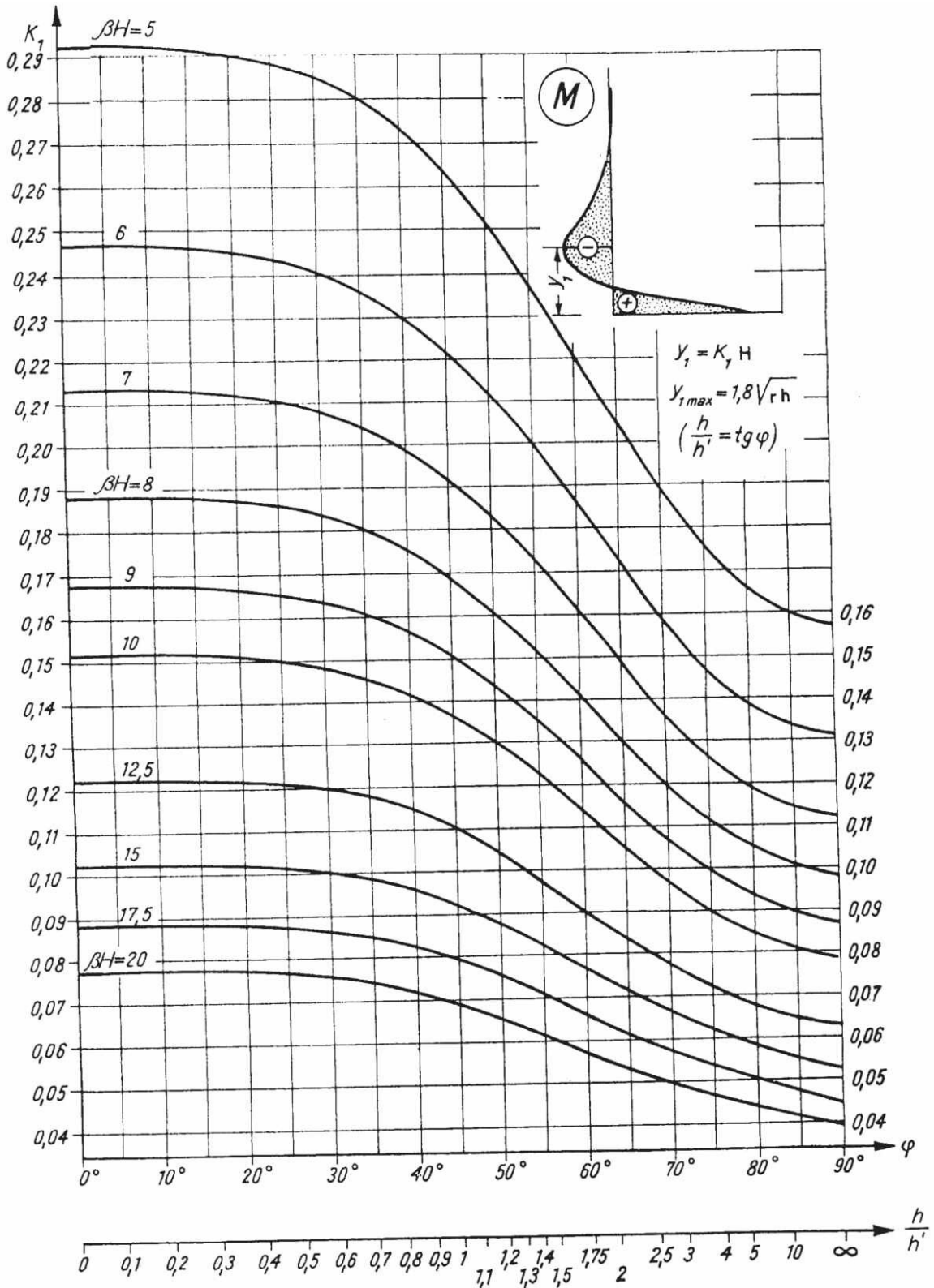
Fonte: Guimarães (1995)

ANEXO B - Ábaco para determinar a ordenada y_0



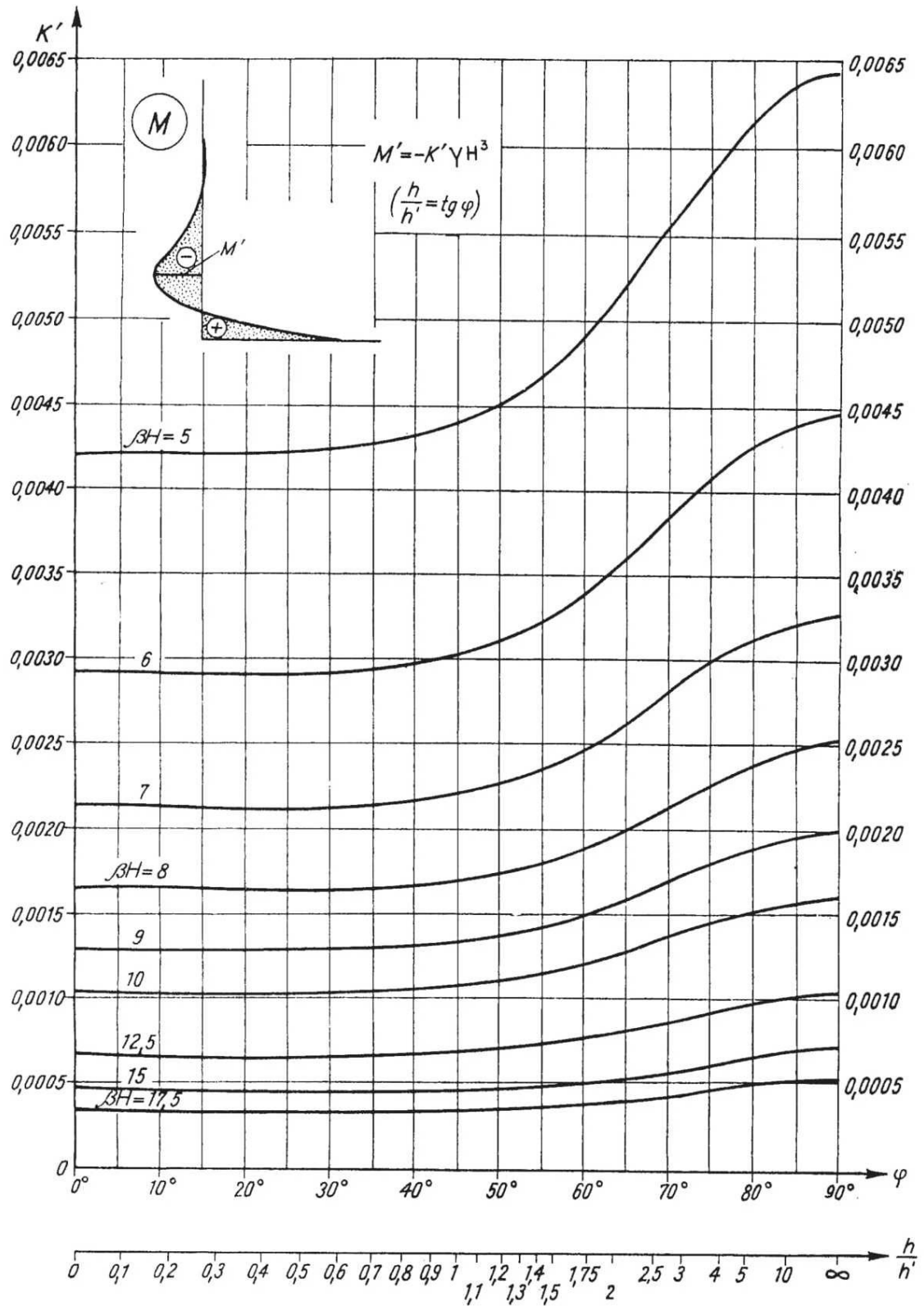
Fonte: Guimarães (1995)

ANEXO C - Ábaco para determinar a ordenada y_1



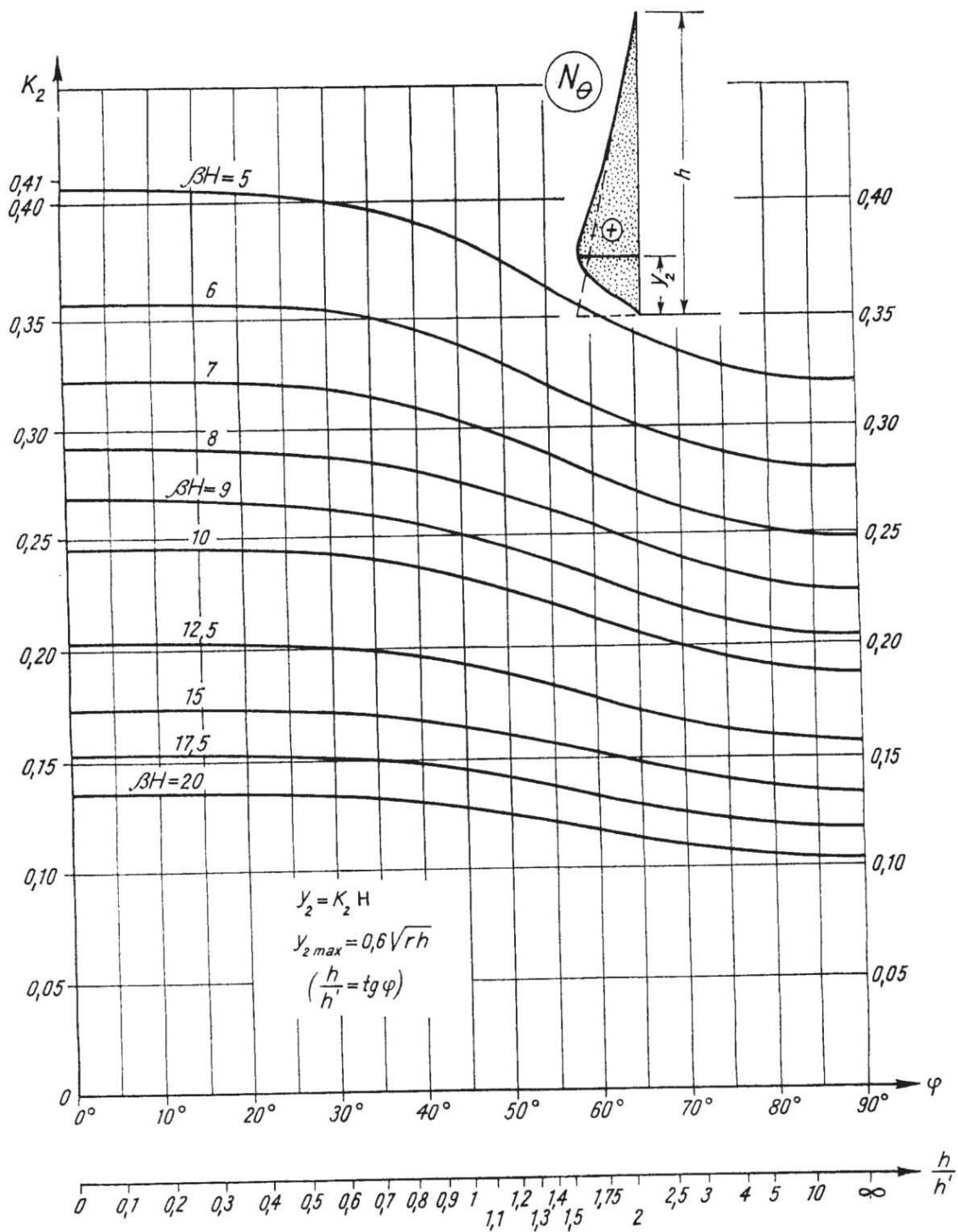
Fonte: Guimarães (1995)

ANEXO D - Ábaco para determinar o momento M'



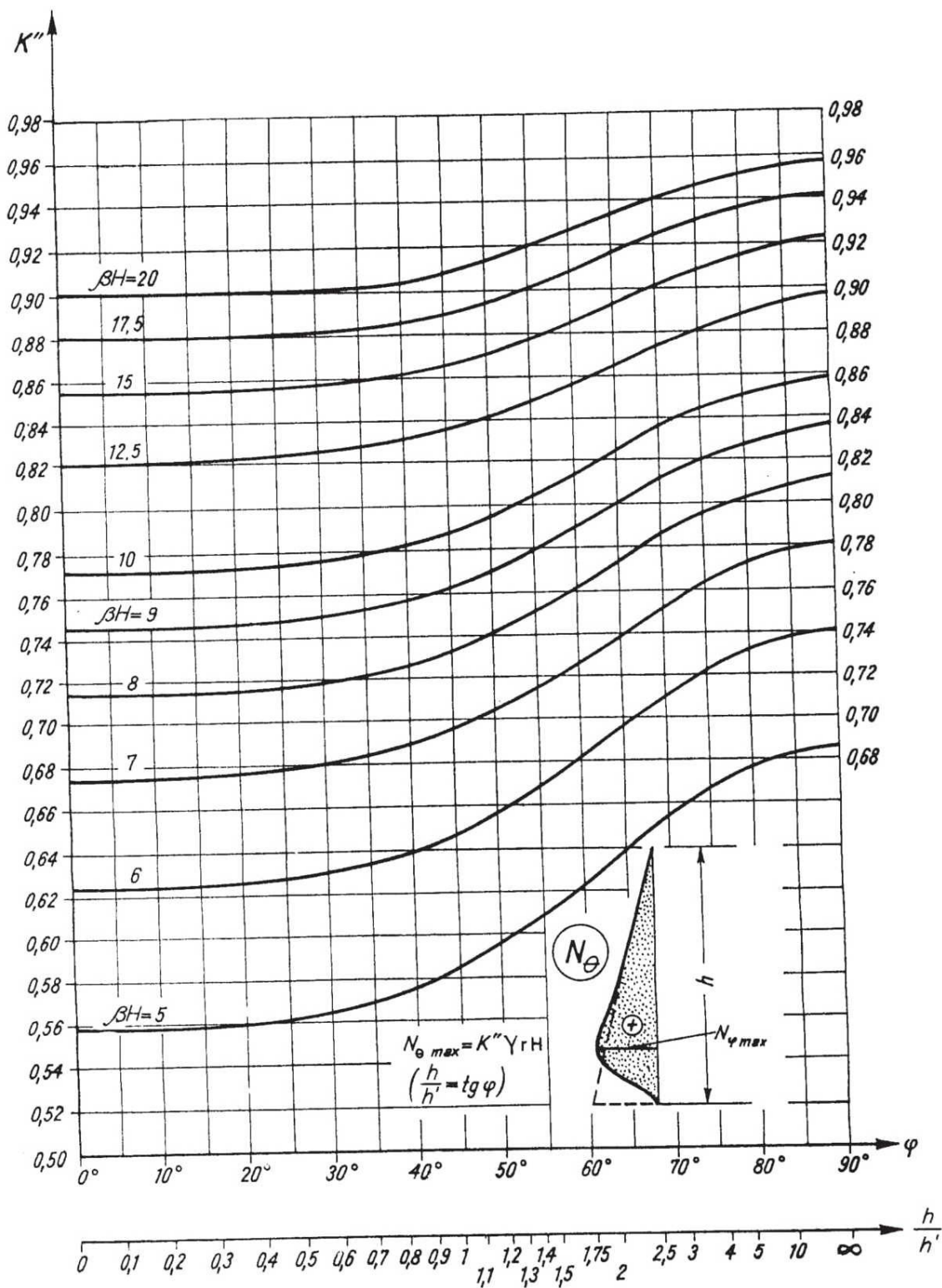
Fonte: Guimarães (1995)

ANEXO E - Ábaco para determinar a ordenada y_2



Fonte: Guimarães (1995)

ANEXO F - Ábaco para determinar o esforço $N_{\theta m \acute{A}x}$



Fonte: Guimarães (1995)