

ANÁLISE ESTRUTURAL DE RESERVATÓRIOS ENTERRADOS DE ARGAMASSA ARMADA COM TELAS DE AÇO SOLDADAS

Dálim Gomes Paniago¹ & João Bento de Hanai²

Resumo

O presente trabalho pretende contribuir para aumentar o conhecimento acerca do comportamento estrutural da membrana de argamassa armada em piscinas e reservatórios. Foram realizadas simulações numéricas por computador com o intuito de se investigar o comportamento da membrana quando submetidas à ação da água, de recalques e de variações de temperatura. A influência das dimensões da estrutura e da resistência da argamassa também foram analisadas. São discutidos estes e outros aspectos relacionados à fase de projeto. O trabalho apresenta ainda breves comentários sobre a etapa de construção, bem como alguns cuidados necessários para a garantia de um material de boa qualidade. Tendo em vista a obtenção de uma estrutura durável e com bom desempenho, é preciso que cada equipe de trabalho tenha um palavra de ordem: aos projetistas, detalhamento; aos construtores, controle; à mão-de-obra, conscientização.

Palavras-chave: piscinas; reservatórios de água; argamassa armada.

1 INTRODUÇÃO

No início da década de 60, tendo em vista as iniciativas pioneiras do Prof. Frederico Schiel, da Escola de Engenharia de São Carlos, começou-se a aplicar a tecnologia de projeto e execução de reservatórios enterrados e piscinas de argamassa armada.

A idéia fundamental é construir no terreno escavado e estabilizado uma membrana impermeável de argamassa armada, capaz de suportar pequenos recalques e acomodações do solo. Para evitar a inconveniência de subpressões, providencia-se um sistema de drenagem constituído por uma camada de areia e pedra britada e tubos furados como coletores. A membrana de argamassa armada pode ser executada no local ou constituída por placas pré-moldadas.

Apesar de muitas obras terem sido construídas com essa tecnologia, todo o conhecimento acerca dela está fundamentado sobre bases empíricas, sem o estabelecimento de uma metodologia que permita a elaboração de projetos, programas de execução, uma melhor avaliação dos riscos envolvidos e uma maior confiabilidade do sistema construtivo.

¹ Mestra em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, dalimgp@hotmail.com

² Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jghanai@sc.usp.br

Dentre os aspectos fortemente marcados pelo empirismo constam:

- determinação da profundidade de escavação, da inclinação dos taludes e do sistema de drenagem;
- composição dos materiais constituintes da argamassa e quantidade de armadura;
- técnicas de construção, referentes principalmente ao lançamento, adensamento e cura da membrana de argamassa.

Além disso, não existem metodologias estabelecidas para:

- avaliar as deformações e a capacidade de acomodação da membrana de argamassa armada;
- relacionar a durabilidade e a vida útil às propriedades dos materiais empregados, aos procedimentos de projeto e às técnicas de execução e manutenção;
- avaliar os esforços solicitantes na membrana de argamassa armada e dimensioná-la.

2 ESTUDO DO SOLO

O estudo da estabilidade de taludes constitui uma das primeiras tarefas de organização metodológica para o projeto e a execução de piscinas e reservatórios.

Para o trabalho em questão interessa-nos pesquisar acerca dos taludes artificiais, pois são eles que podem fazer parte das piscinas e reservatórios enterrados. Os taludes artificiais adequam-se melhor às teorias desenvolvidas para análise da estabilidade por apresentar uma maior homogeneidade quando comparados aos taludes naturais.

Atuar sobre os mecanismos instabilizadores é a idéia fundamental dos projetos de estabilização de taludes. Como exemplo de mecanismos instabilizadores pode-se citar a percolação de água pelo maciço, a erosão e os escorregamentos.

Um talude é considerado estável se possuir um fator de segurança maior que 1. No entanto, as tensões atuantes e resistentes podem ser alteradas com o tempo. Dessa forma, nota-se que a avaliação da estabilidade de taludes depende diretamente do conhecimento de fenômenos que podem induzir a situações críticas, além das propriedades mais significativas dos materiais em estudo, que são o ângulo de atrito e a coesão. No entanto, estes parâmetros do solo podem variar com uma série de fatores, tais como a faixa de carregamento aplicada ao solo, o tipo de ensaio efetuado e o histórico de tensões experimentado pelo solo, dentre outras condições.

O fato de existir um grande número de parâmetros envolvidos, interagindo entre si, evidencia a impossibilidade de uma avaliação precisa da estabilidade de um talude. Porém, uma avaliação quantitativa pode conduzir a um valor relativo, que auxilia na compreensão do comportamento e da sensibilidade de um talude face às mudanças de parâmetros considerados críticos.

A análise por meio do *método do equilíbrio-limite* é a mais difundida atualmente, pois a análise do talude não deve ser mais complexa que o nível de conhecimento acerca dele.

O equilíbrio-limite baseia-se na teoria da plasticidade e tem como hipóteses:

— existe uma linha de escorregamento de forma definida, seja ela plana, circular, espiral-logarítmica ou mista. Acima dessa linha está a porção instável do solo, que se movimenta como corpo rígido sob a ação da gravidade;

— o material disposto ao longo da linha de escorregamento respeita um critério de resistência, sendo o mais utilizado o de Mohr-Coulomb.

A idéia básica do método consiste em admitir que as forças instabilizadoras são *exatamente* balanceadas pelos esforços resistentes. Portanto, a condição limite corresponde a um fator de segurança igual a 1. Simplificadamente, pode-se fazer uma analogia com um bloco apoiado sobre um plano de inclinação i (vide Figura 1).

O esforço resistente é :

$$R = \tau \cdot A \quad (1)$$

onde:

τ - resistência ao cisalhamento ($\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi$)

A - área da seção de contato bloco-plano

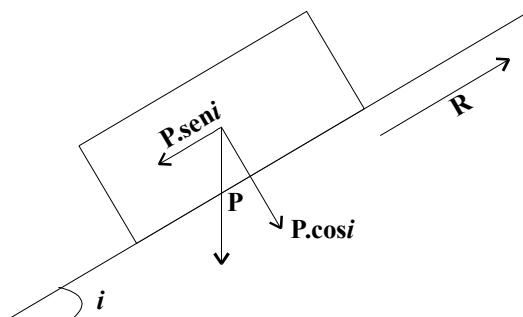


Figura 1 - Relação de forças na análise de equilíbrio-limite [GUIDICINI & NIEBLE (1976)]

Supondo não existir coesão, a obtenção do fator de segurança pode ser equacionada da seguinte forma:

$$\sigma = (P \cdot \cos i) / A$$

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi$$

$$\tau = [(P \cdot \cos i) / A] \cdot \operatorname{tg} \phi$$

$$R = \tau \cdot A = [(P \cdot \cos i) / A] \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot A = P \cdot \cos i \cdot \operatorname{tg} \phi$$

$$FS = R / (P \cdot \operatorname{sen} i)$$

$$FS = (P \cdot \cos i \cdot \operatorname{tg} \phi) / (P \cdot \operatorname{sen} i)$$

$$FS = \operatorname{tg} \phi / \operatorname{tg} i \quad (2)$$

Na condição limite ($FS = 1$), ou seja $\phi = i$. Esta é uma análise bastante simplificada. Na verdade, é preciso conhecer as limitações do método e adotar fatores de segurança.

Uma deficiência deste método é ignorar a relação tensão/deformação do solo.

Há diversos métodos de análise de estabilidade de taludes baseados no equilíbrio-limite. Cada método adota um tipo de ruptura: circular, plana ou em cunha. Pode-se citar o Método de Culmann, o Método das Cunhas, o Método do Círculo de Atrito ou de Taylor e o Método das Lamelas como exemplos. Dentre estes, O Método de Culmann é particularmente interessante para o estudo em questão, uma vez que possibilita calcular diretamente a altura máxima para um talude vertical, construído em determinado solo, com um fator de segurança pré-determinado, através da seguinte expressão:

$$H_{\max} = \frac{4 \cdot c_m \cdot \sin i \cdot \cos \phi_m}{\gamma \cdot [1 - \cos(i - \cos \phi_m)]} \quad (3)$$

2.1 Camada de filtro

A membrana de argamassa armada tem por finalidade básica a impermeabilização do terreno, impedindo a perda de água da piscina ou reservatório. Se ela for disposta diretamente sobre o solo, a percolação de água neste último pode provocar o aparecimento de subpressões que solicitam a membrana. Para evitar que isto aconteça, dispõe-se uma camada de material drenante sob a membrana.

O dreno tem a função de filtro, ou seja, permitir a livre passagem da água sem que haja um deslocamento das partículas de solo. Portanto, um filtro deve atender a duas condições básicas.

A primeira delas refere-se à permeabilidade: os vazios existentes entre as partículas do filtro devem ser grandes o suficiente para resultar em um coeficiente de permeabilidade maior que o do solo local. Assim, eles permitirão a livre drenagem da água e o controle das forças de percolação.

A segunda condição diz respeito à granulometria adequada para evitar o desenvolvimento de erosão interna: as partículas do filtro devem ser suficientemente pequenas, a fim de evitar o carreamento de partículas de solo para dentro do filtro, provocando a sua colmatação e a desagregação do solo local.

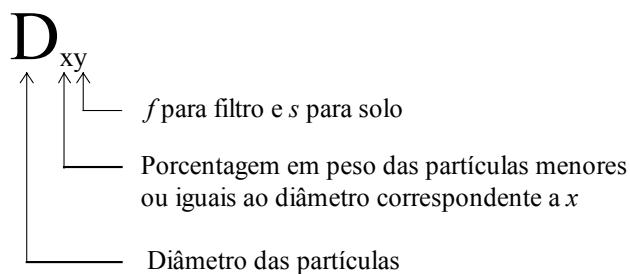
Além destes dois critérios, é recomendável que a curva granulométrica do filtro se assemelhe à do solo.

Visando o atendimento de tais restrições, Terzaghi estipulou o seguinte³:

$$D_{15f} \begin{cases} < 4 \text{ a } 5 D_{85s} \\ > 4 \text{ a } 5 D_{15s} \end{cases} \quad (4)$$

onde:

³ O fator 4 aplica-se a materiais de filtro tais como areias artificiais e brita.



Uma alternativa para a execução do filtro seria o uso de mantas geotêxteis. Estas mantas seriam diretamente dispostas no terreno e, sobre elas, colocar-se-ia uma camada de brita. A granulometria dessa camada não estaria necessariamente relacionada à granulometria do solo. Apesar de ser uma alternativa bastante prática, poderia resultar em custo elevado. Provavelmente, elas seriam competitivas em regiões onde não houvesse disponibilidade de material para a construção do filtro. No entanto, é preciso lembrar a grande facilidade e rapidez de execução proporcionadas pelo uso de tais mantas — o que, em outras palavras, significa economia no custo da mão-de-obra.

Uma terceira alternativa para a montagem do dreno seria a utilização de um sistema pré-fabricado denominado “Multidren”⁴. Este sistema associa um núcleo drenante de polietileno de alta densidade ao geotêxtil Bidim, que o envolve. O primeiro é responsável pelo rápido escoamento da água, enquanto o segundo protege-o da invasão de partículas de solo que prejudicariam sua função. As principais vantagens do sistema também são a rapidez e facilidade de execução.

3 MATERIAIS COMPONENTES DA MEMBRANA

A membrana de argamassa armada pode ser dividida basicamente em dois componentes: a argamassa e a armadura.

A garantia das qualidades desejadas para a argamassa depende dos seus materiais constituintes, bem como do seu processo de execução.

Duas importantes relações de composição da argamassa são: água/cimento e pasta/agregado. A primeira delas não influí somente nas propriedades da argamassa fresca, tais como consistência e trabalhabilidade, mas também naquelas relativas ao material endurecido. Uma dessas propriedades é a resistência mecânica da argamassa, que diminui à medida que se aumenta a proporção de água na mistura. Além dela, propriedades de deformação, bem como propriedades físicas e químicas da argamassa, são diretamente influenciadas pela relação água/cimento.

A argamassa é o material que dá corpo aos elementos, pois ocupa a maior parte do seu volume. Como tal, ela não está sujeita somente a danos de origem mecânica, mas sofre também o ataque de agentes químicos. Esse tipo de ataque

⁴ Sistema fabricado e fornecido pela Rhodia-Ster.

atua deteriorando o material e, portanto, reduzindo a sua vida útil. Em função disso, espera-se que a argamassa apresente desempenho satisfatório com relação a:

- a) apresentar resistência mecânica e rigidez suficientes para suportar os esforços atuantes sem apresentar grandes deformações;
- b) possuir elevada compacidade, a fim de evitar a passagem de líquidos e gases para o seu interior, o que provoca a corrosão da armadura;
- c) ser estável física e quimicamente, fazendo com que os efeitos decorrentes de retração, fluênciça e variações volumétricas permaneçam dentro de limites aceitáveis;
- d) possuir resistência à abrasão.

A retração é um fenômeno particularmente importante no estudo da argamassa armada, uma vez que os elementos desse material, em virtude da sua pequena espessura, possuem uma grande superfície exposta ao meio ambiente. Isto provoca uma maior susceptibilidade do material aos efeitos da retração, dentre os quais inclui-se a fissuração da argamassa, podendo provocar uma diminuição da proteção da armadura contra a corrosão. Percebe-se, portanto, a grande importância do combate à retração da argamassa, através de uma cura cuidadosa e da utilização de valores mais baixos para o teor de cimento e para a relação água/cimento.

A durabilidade é um importante aspecto a ser considerado ao se projetar e construir uma estrutura. Diversas causas podem influir negativamente na durabilidade das argamassas. Tais causas podem ser físicas ou químicas. Entre as primeiras estão a fissuração e o desgaste superficial da argamassa. A fissuração pode ser provocada por alterações de volume — devidas a gradientes térmicos ou à pressão de cristalização de sais nos poros —, carregamento estrutural ou exposição a temperaturas extremas — como nos casos de congelamento ou fogo. Lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas, reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reações álcali-agregado e corrosão das armaduras são causas químicas que provocam efeitos deletérios à argamassa.

Na realidade, causas físicas e químicas não ocorrem dissociadamente, podendo, inclusive, influenciar uma à outra. Por exemplo, o surgimento de fissuras abre caminho para que os agentes químicos deletérios penetrem na argamassa.

Porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma, textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e presença de substâncias deletérias são importantes características dos agregados para a tecnologia do concreto e da argamassa, pois têm influência tanto na dosagem quanto nas propriedades nos estados fresco e endurecido.

Os agregados usualmente empregados na fabricação de argamassa armada são as areias naturais, mas também podem ser utilizadas areias artificiais.

Conforme o próprio nome indica, a argamassa armada é constituída por agregados miúdos, ou seja, aqueles cujo diâmetro máximo não ultrapassa 4,8 mm. No entanto, algumas pesquisas têm mostrado bons resultados no uso de agregados classificados como graúdos, mas com tamanho geralmente inferior a 9,5 mm. Este material tem sido denominado de microconcreto e apresenta vantagens como a redução do consumo de cimento, em virtude da menor área superficial de agregado por volume de concreto.

Trabalhabilidade e custo são algumas razões para a especificação de limites granulométricos. Por exemplo, areias muito grossas produzem misturas com menor

trabalhabilidade, enquanto areias muito finas provocam um aumento no consumo de água e de cimento, tornando-se anti-econômicas.

Aditivo é um material a ser misturado com a água, os agregados e os aglomerantes hidráulicos objetivando a melhoria de algumas propriedades do concreto ou da argamassa, tais como: aumentar a plasticidade da mistura sem alterar o teor de água, reduzir a exsudação e a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar o desenvolvimento de resistência nas primeiras idades, diminuir o calor de hidratação, aumentar a durabilidade da argamassa ou concreto sujeito a condições específicas, aumentar a compacidade e diminuir a higroscopicidade.

As adições para concretos e argamassas que parecem ter futuro promissor são a sílica ativa e as fibras.

Uma propriedade da sílica ativa é a capacidade de consumir quase completamente o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento. Isto resulta numa melhoria da resistência do concreto ou argamassa ao ataque de ácidos e sulfatos. Ela pode ainda proporcionar a obtenção de resistências mecânicas elevadas (caso se utilizem aditivos redutores de água).

As fibras utilizadas como adição em concretos e argamassas podem ser metálicas (aço), sintéticas (polietileno, polipropileno, nylon, acrílico, carbono), de vidro e naturais (bambu, coco, sisal). Estas últimas não são muito utilizadas pois, por terem origem orgânica e serem atacadas pelos álcalis do cimento, conferem uma baixa durabilidade ao compósito. As fibras de aço são as mais disseminadas, tanto para aplicações estruturais quanto para as não-estruturais; os outros tipos de fibras geralmente são utilizadas em elementos cuja finalidade não é estrutural.

Comparado ao concreto comum, o concreto reforçado com fibras apresenta um melhor comportamento pós-fissuração. Isto implica em dizer que a adição de fibras não altera muito a resistência à tração do material, mas aumenta consideravelmente as deformações de ruptura à tração. Conseqüentemente, o concreto com fibras tem maior tenacidade e maior resistência ao impacto. A magnitude do acréscimo de tenacidade depende da proporção de fibras na mistura e da sua resistência ao arrancamento que, por sua vez, é influenciada pela relação comprimento/diâmetro (relação de aspecto) da fibra, pela sua forma e textura superficial. Outra vantagem da utilização de fibras reside no fato delas constituírem um eficiente meio de se combater a fissuração por retração da argamassa. O ACI 549.1R-88 afirma, inclusive, que a adição de fibras retarda o crescimento da abertura de fissuras e permite o uso de telas com maior espaçamento entre os fios.

Contudo, a introdução de fibras provoca uma perda de trabalhabilidade proporcional à sua concentração volumétrica no concreto ou argamassa. O aumento de tenacidade implica no uso de fibras com maiores relações de aspecto e em maiores quantidades. Portanto, precisa-se saber dosar o teor de fibras para se obter a tenacidade desejada com uma redução de trabalhabilidade aceitável.

Dois tipos de armadura podem constituir a argamassa armada: uma difusa, formada pelas telas de aço de pequena abertura, e outra discreta, formada por fios e barras de aço de pequeno diâmetro.

A função da armadura difusa é resistir aos esforços de tração, limitar a abertura de fissuras e proporcionar uma configuração de fissuras pouco espaçadas. A armadura discreta visa suprir, de forma localizada, a necessidade de seção transversal de aço para que sejam preenchidos os requisitos de segurança à ruptura e

deformações excessivas. Uma outra função deste tipo de armadura seria enrijecer e facilitar a montagem das telas que constituem a armadura difusa.

As telas empregadas em argamassa armada podem ser tecidas (com malha quadrada, retangular ou hexagonal), soldadas (com malhas quadradas ou retangulares) ou formadas a partir de chapas expandidas. A rigidez das telas soldadas facilita a montagem de superfícies planas e com curvatura simples, mas dificulta a aplicação em superfícies com curvatura dupla ou com pequenos raios.

4 COMPORTAMENTO DA MEMBRANA

A membrana de argamassa armada constituinte dos reservatórios enterrados pode estar sujeita a vários tipos de ações: mecânicas (impacto, ação hidrostática, recalques), físicas (retração, variações de temperatura) e químicas (agentes agressivos).

Tendo em vista o escopo do trabalho, são analisados aqui somente três tipos básicos de ações: hidrostática, retração da argamassa e recalque do terreno. A fim de estudar os esforços gerados por cada uma delas, são apresentadas simulações feitas com o auxílio do software LUSAS⁵, um programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos.

A idéia central é levantar dados que permitam um conhecimento qualitativo do comportamento do material a partir de casos específicos, pois seria impraticável simular situações genéricas. Dessa forma, são tomadas as características de dois tipos de solo⁶ (areia compacta média e argila medianamente rija), estipulados dois tipos de reservatório e assumidas as características da argamassa e os valores de recalque em determinados pontos.

Por facilidade de compreensão e análise, cada ação é simulada separadamente. Como os efeitos em questão são de primeira ordem, supõe-se que o resultado final constitui-se de uma somatória dos efeitos parciais provocados por cada uma das ações.

Para simular a reação do solo e sua interação com a estrutura, considera-se a *Hipótese de Winkler*. Segundo ela, o solo pode ser representado por um meio constituído por molas, onde as pressões de contato são proporcionais aos deslocamentos. Este modelo pode ser utilizado tanto para carregamentos horizontais quanto verticais, exatamente o que ocorre no estudo em questão.

a) Comportamento da membrana sujeita à ação hidrostática

A água atua nas paredes do reservatório exercendo pressões de acordo com uma configuração triangular. Já no fundo, essa atuação corresponde a uma carregamento uniformemente distribuído. A Figura 2a mostra o esquema destas configurações. Como o sentido das forças atuantes é de dentro para fora, há uma tendência em aumentar o ângulo formado pela junção dos planos constituídos pela membrana (vide Figura 2b). Conseqüentemente, surgem esforços de tração e de flexão na região da ligação, que podem provocar a fissuração da argamassa conforme

⁵ LUSAS - versão 11.3 de fevereiro de 1995.

⁶ As características do solo foram assumidas a partir dos dados contidos na literatura.

a magnitude das tensões desenvolvidas. Por sua vez, o desenvolvimento destas tensões depende de dois fatores:

- das condições de vinculação que, para o caso em questão, corresponde ao coeficiente de reação do solo;
- da grandeza da ação, ou seja, da altura da coluna d'água atuante (correspondente, por sua vez, à profundidade do reservatório).

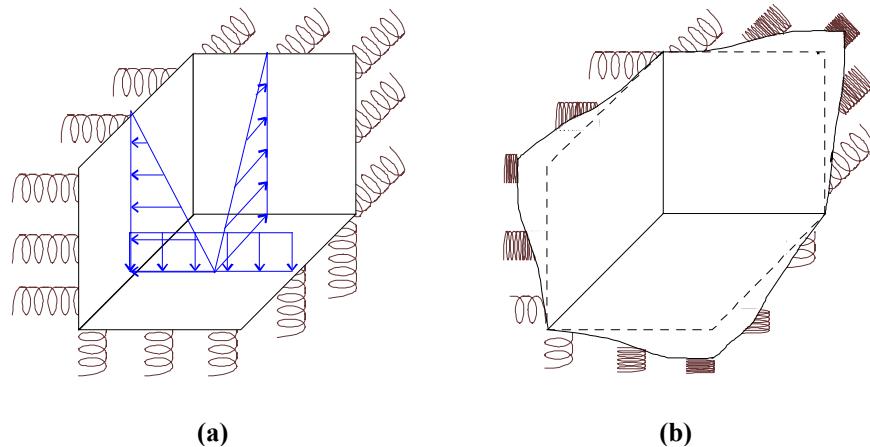


Figura 2 - (a) ação da água na membrana do reservatório; (b) deformação provocada pela ação do carregamento

b) Comportamento do maciço de solo quanto a recalques

Ao ser submetido a esforços de compressão, o solo se deforma. Denomina-se recalque o deslocamento do solo decorrente dessa deformação. Os recalques constituem-se de três parcelas: recalque imediato ou elástico, recalque primário ou por adensamento e recalque secundário ou secular.

A previsão de recalques do solo envolve uma série de parâmetros, tais como suas características e seu comportamento ao longo do tempo. Por este motivo, tal previsão é difícil e, por mais apurados que sejam os cálculos, deve ser considerada apenas como uma *estimativa*.

Em virtude do peso específico da água ser menor que o do solo, poder-se-ia supor precocemente a inexistência de recalques, pois o carregamento atual seria inferior ao pré-existente. No entanto, deve-se lembrar que o peso da cobertura dos reservatórios atuando em pilares pode provocar um recalque localizado do solo de apoio. Além disso, caso o reservatório tenha sido construído sobre aterros mal compactados ou sobre solos colapsíveis, pode ocorrer um rebaixamento localizado que poderá deixar a membrana de argamassa armada sem apoio e, portanto, sujeita a deformações superiores às previstas.

c) Comportamento à retração

A retração é um fenômeno variável no tempo e não ocorre dissociadamente da fluênciça. Daí decorre a dificuldade de simulação numérica.

O solo não responde de forma linear, não sendo possível adotar a hipótese de Winkler. A interação solo/estrutura se dá na forma de atrito sendo, portanto, necessária a consideração da camada de filtro anteriormente desprezada — pois o embricamento entre os agregados possivelmente reduziria a deformabilidade do apoio; dessa forma, a não consideração dessa camada trabalharia a favor da segurança.

Outro fator de influência é a presença da armadura, que também provoca uma restrição à redução de volume do material.

Devido a estes fatores, a simulação do fenômeno da retração é complexa, exigindo cautela na sua elaboração e avaliação. A fim de se estabelecer um método de análise simplificado, é preciso tentar compreender qual a tendência de comportamento da membrana quando sujeita a variações de volume.

Tomando-se o caso mais simples, ou seja, reservatórios sem taludes no fundo, a variação volumétrica produziria aproximadamente a configuração esquematizada na Figura 3a — caso a estrutura estivesse simplesmente apoiada e, portanto, livre para se contrair.

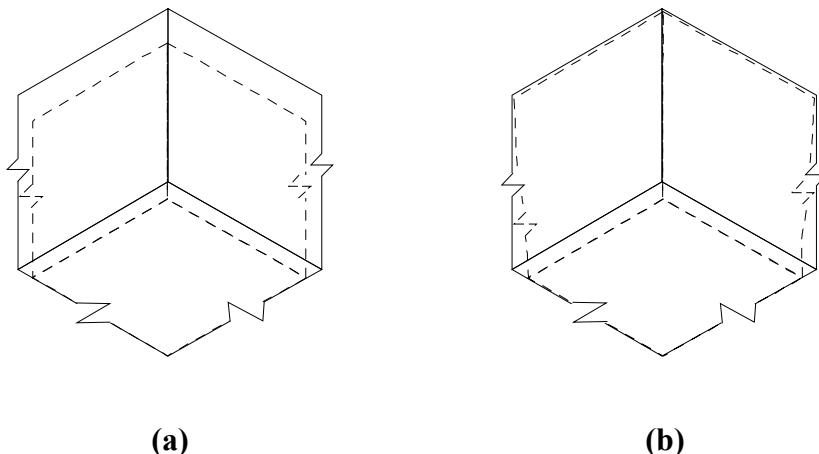


Figura 3 - Deformação da membrana sujeita a variação volumétrica uniforme (a) e diferencial entre parede e fundo (b)

Na laje de fundo alguns fatores se contrapõem a esse movimento:

- o atrito membrana/camada de regularização/filtro;
- a aderência entre esses materiais;
- o embricamento entre os agregados da membrana e da camada de regularização.

Já nas paredes, essa situação é um pouco diferente, por causa do atrito. Para a manifestação deste, é necessária a existência de uma força normal ao plano de deslizamento. No caso mais crítico, ou seja, com o reservatório vazio, inexiste essa força, pois ela seria provocada somente pela ação da água, uma vez que o peso próprio atua verticalmente. Portanto, para as paredes, a contribuição relativa ao atrito pode ser desprezada.

A consideração da aderência entre os materiais depende do modo construtivo: se as placas forem pré-moldadas, essa propriedade não se manifesta.

Há também um outro efeito do comportamento ao movimento de contração: o empenamento. Em uma placa isolada ocorreria uma abaumento, com consequente levantamento dos cantos. Não é o caso, pois os encontros entre as placas inibem essa tendência. Para as paredes, essa restrição é maior no fundo que no topo — porque no primeiro há uma restrição em dois planos e no segundo apenas em um.

Se houver uma variação de volume diferenciada entre as paredes e o fundo, a magnitude das restrições é ainda maior. A Figura 3b indica a possível deformação da membrana para o caso de o fundo contrair-se mais que as paredes — ocorrência comum, principalmente no caso de pré-moldagem, pois as placas das paredes já iniciaram seu processo de retração quando o fundo é moldado.

4.1 Simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos

Como foi dito anteriormente, houve a necessidade de se tomar casos particulares a fim de se conhecer qualitativamente o comportamento do material. Foram estabelecidos então diferentes tipos de reservatório, de solo e de resistência da argamassa. O objetivo da escolha foi investigar a influência das dimensões e configurações do reservatório, da deformabilidade do apoio e da qualidade da argamassa no comportamento mecânico da estrutura.

A Figura 4 esquematiza os modelos de reservatório adotados. A fim de otimizar o tempo de execução do programa e melhorar a visualização dos resultados, aproveitou-se a sua simetria, tomando-se um quarto do reservatório e impondo-se condições de contorno às extremidades.

Os valores dos coeficientes de reação vertical e horizontal dos solos adotados constam na Tabela 1⁷.

Para a resistência da argamassa foram adotados dois valores: um relativamente baixo (20 MPa) e outro de 40 MPa.

A espessura especificada para a membrana foi de 2,5 cm — tendo em vista as aplicações correntes.

Levando-se em conta o tempo de execução do programa e os resultados obtidos, optou-se por dois tipos de malha: uma quadrangular, com elementos de $10 \times 10 \text{ cm}^2$, para o reservatório menor e outra de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ para o reservatório maior — nos cantos os elementos tinham área variável, em virtude da configuração da estrutura.

⁷ Nota-se que esse coeficiente é dado em unidade de força por unidade de volume. No entanto, a entrada de dados no programa requer um coeficiente de mola definido em unidade de força por unidade de comprimento. Contornou-se tal situação multiplicando o coeficiente de reação do solo pela área do elemento.

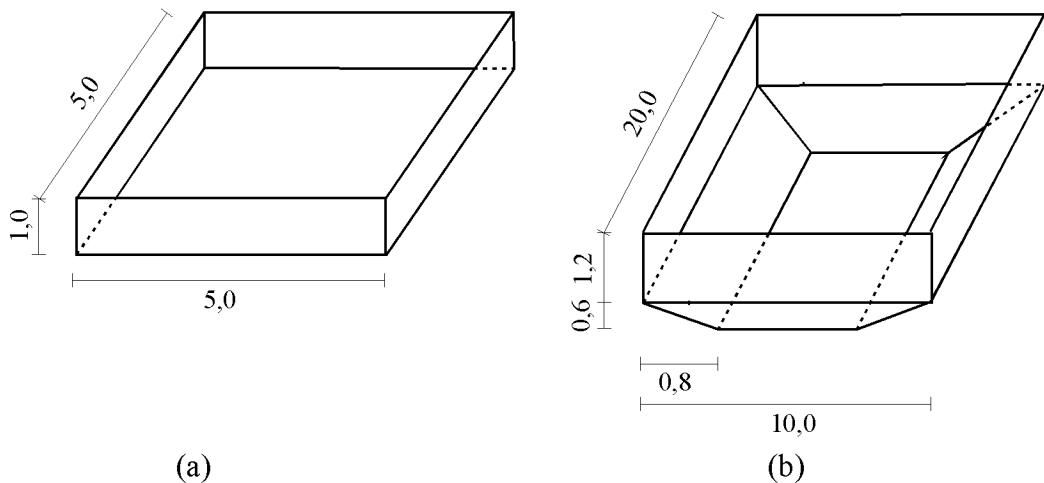


Figura 4 - Modelos de reservatórios adotados nas simulações numéricas

Tabela 1 - Coeficientes de reação do solo k (kN/cm^3)

Reação	Solo areia compacta média	argila medianamente rija
vertical	40×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$
horizontal	7×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$

4.1.1 Ação hidrostática

Os deslocamentos podem ser estimados através de uma análise feita com o Método das Diferenças Finitas. A seguinte expressão define a equação diferencial de flexão para placas sob apoio elástico:

$$\nabla^4 w + \frac{k}{D} \cdot w = \frac{q}{D} \quad (4)$$

onde:

w - deslocamento nodal

k - coeficiente de mola do apoio

q - carga uniformemente distribuída

$$D - \text{constante de placa} \quad D = \frac{E \cdot d^3}{12 \cdot (1 - \nu)}$$

O momento de fissuração, calculado segundo indicação da NBR-11.173 para o caso de seção transversal retangular, é definido pela seguinte expressão⁸:

⁸ Esta expressão considera a retração de modo simplificado, tomando-se $f_{ct} = 0,75 f_{tk}$. Ela também despreza a presença da armadura.

$$M_r = 0,25bh^2 f_{tk} \quad (5)$$

onde:

b, h: largura e espessura da placa.

f_{tk} : resistência característica à compressão da argamassa

Como está se lidando com uma estrutura em casca, os esforços são dados por unidade de comprimento. Dessa forma, o momento de fissuração a ser comparado com os resultados é:

$$M'_r = \frac{M_r}{b} \quad (6)$$

A Tabela 2 resume os valores previstos.

Tabela 2: Previsão de valores para as simulações numéricas

	Apoio em areia	Apoio em argila
w_{\max} (cm)	$2,5 \times 10^{-3}$	0,4
	$f_{ck} = 20 \text{ Mpa}$	$f_{ck} = 40 \text{ Mpa}$
f_{tk} (kN/cm^2)	0,19	0,31
M'_r ($\text{kN}\cdot\text{cm}/\text{cm}$)	0,297	0,484

Para o caso de deslocamentos, os resultados obtidos com o programa confirmam a previsão de valores. Mostram ainda a coerência da hipótese de apoio elástico adotada, pois os deslocamentos se alteram na mesma proporção da mudança do coeficiente de mola.

A estanqueidade é um fator de crucial importância em um reservatório. Sendo assim, a verificação da ocorrência de fissuração é fundamental. Um critério simples corresponderia a comparar os momentos fletores máximos ao momento de fissuração; caso os primeiros ultrapassassem o valor deste último, a região analisada estaria sujeita à fissuração. A Tabela 3 mostra as prováveis regiões de fissuração.

Outras observações que podem ser extraídas dos resultados são:

a) Aumentando-se a deformabilidade do solo, aumentam os esforços. Para ambos os reservatórios, os esforços praticamente duplicaram ao se utilizar as características da argila como material de apoio (o que é evidente, pois uma maior deformabilidade implica em maiores deslocamentos, ocasionando a elevação dos esforços);

b) De modo geral, os resultados levantados mostraram-se satisfatórios, vindo de encontro à expectativa de comportamento em relação ao material. Confirmou-se a pressuposta concentração de tensões nas regiões das arestas. Isto indica que, para o caso de ações hidrostáticas, essas regiões necessitam de maior quantidade de

armadura. O dimensionamento dessa armadura depende da magnitude dos esforços desenvolvidos. Estes, por sua vez, estão intimamente relacionados às dimensões do reservatório e às condições de apoio;

c) Como a alteração da qualidade da argamassa não influía na ação em si, o comportamento esperado era que as tensões permanecessem praticamente inalteradas, enquanto o valor da resistência se elevava. Isto resultaria num melhor desempenho da membrana. De fato, é pequeno o efeito do aumento do módulo de elasticidade nos esforços e deslocamentos;

d) Aumentando-se a resistência da argamassa, as áreas sujeitas à fissuração geralmente diminuem — chegando mesmo a desaparecer, conforme mostra o diagrama do reservatório menor apoiado em areia (vide Tabela 3). Pode-se inferir dessas observações que, para um reservatório de pequenas dimensões apoiado sobre solo pouco deformável, a simples elevação da resistência da argamassa poderia solucionar o problema da fissuração;

e) A relação momento máximo/momento de fissuração decresce com o aumento da resistência da argamassa. Isto indica que, mesmo ocorrendo fissuras, elas terão menor abertura sendo, portanto, menos críticas.

4.1.2 Ação hidrostática e enrijecimento da membrana

Pelo que foi visto no item anterior, somente a elevação da resistência da argamassa não é, em geral, suficiente para evitar a fissuração. Uma outra alternativa seria aumentar a espessura da membrana — talvez até mais eficiente, pois o momento fletor de fissuração varia linearmente com a resistência da argamassa, mas de forma quadrática com a variação de espessura.

No entanto, somente as regiões mais solicitadas necessitam desse enrijecimento. Por isto, a partir dos resultados obtidos anteriormente, tomou-se as regiões sujeitas à fissuração para cada caso e adotou-se espessuras maiores para elas.

Numa situação real, o aumento de espessura seria associado a um aumento do número de telas. Se houvesse um aumento mínimo de espessura, ele poderia ser insuficiente para encaixar novas telas. Outro aspecto importante diz respeito à execução: variações de espessura muito pequenas dificultariam o trabalho na obra — talvez não sendo sequer exequíveis. Por estes motivos, adotou-se uma espessura de 4,5 cm para todos os casos de enrijecimento.

Os resultados indicam que, ao contrário do que se esperava, a fissuração não deixa de ocorrer. A Tabela 4 mostra as zonas de fissuração para o caso.

Também é importante notar que a redistribuição dos esforços, ocasionada pelo enrijecimento, causa um aumento das tensões, podendo provocar fissuras na zona de ligação entre parede e talude.

O simples enrijecimento parece mostrar-se um pouco mais eficiente que o aumento da resistência da argamassa. Mas a associação de ambos reduz sensivelmente o risco de fissuração; e, mesmo esta ocorrendo, deve-se lembrar que momentos mais próximos ao momento de fissuração geram fissuras de menor abertura, desde que haja uma armadura mínima. Portanto, tal associação é mais interessante tanto do ponto de vista da durabilidade quanto da estanqueidade.

Tabela 3 - Zonas de fissuração na membrana sujeita à ação hidrostática

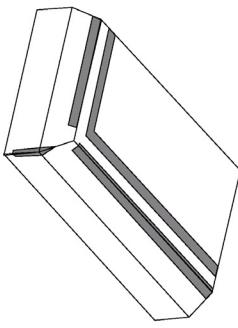
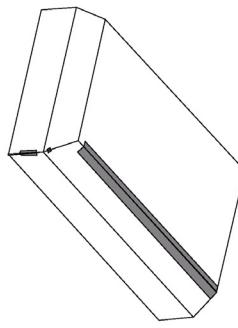
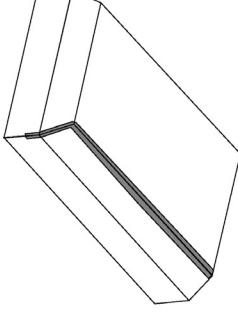
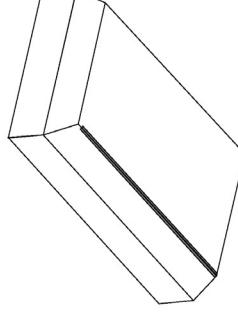
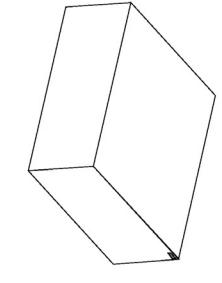
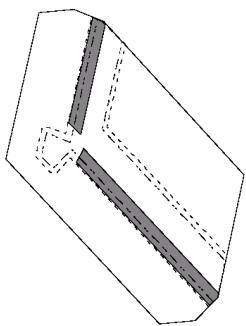
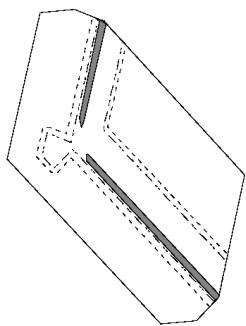
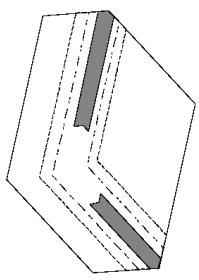
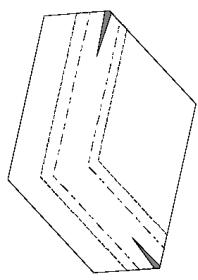
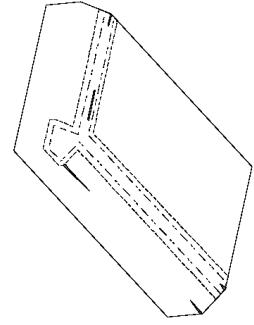
Apoio em argila		
Apoio em areia		
		(não fissura)
$f_{ck} = 20 \text{ MPa}$		

Tabela 4 – Zonas de fissuração na membrana enrijecida sujeita à ação hidrostática

	Apoio em argila	
		
		
		(não fissura)
Apoio em areia		
		$f_u = 40 \text{ MPa}$
		$f_u = 20 \text{ MPa}$

4.1.3 Retração

Como dito anteriormente, a retração é um fenômeno bastante difícil de ser simulado, devido à sua ocorrência ser complexa, além de variável no tempo. Buscou-se, dentre algumas, uma alternativa que, de maneira simples, fornecesse alguns dados iniciais para a análise dos efeitos de variações volumétricas na estrutura.

A forma adotada foi aplicar à estrutura uma redução de temperatura de 15 °C. O caso mais crítico acontece quando há uma variação volumétrica diferencial. Por este motivo, aplicou-se o carregamento de temperatura apenas no fundo do reservatório⁹.

O solo não pode ser considerado como apoio elástico neste caso. A oposição ao deslocamento se deve ao atrito entre a membrana e a camada de regularização. Então, estas foram simuladas como duas cascas justapostas e interligadas. A mais externa, correspondente à regularização, possuía 1 cm de espessura e resistência à compressão igual a 8 MPa (dados correntes na prática, uma vez que essa é uma camada pobre e delgada). Para a membrana de argamassa armada foi adotada uma espessura de 2,5 cm e resistências da argamassa de 20 e 40 MPa, como nos casos anteriores. Apenas o fundo encontrava-se apoiado verticalmente (no início do capítulo já se fez alusão à necessidade de força normal para que haja atrito; com essa adoção, despreza-se a parcela correspondente à aderência entre o filtro e a camada de regularização — o que, além de não ser significativo, dificultaria a simulação numérica).

Como previsto, neste tipo de solicitação predominam os esforços axiais. Coerentemente, as zonas críticas situam-se nos cantos — pois aí se concentram as restrições ao movimento. O aumento das dimensões do reservatório causa um crescimento dessas áreas, mas não de forma proporcional — é por isso que, nas estruturas correntes de concreto armado são feitas juntas. Nota-se que, para o caso do reservatório maior com $f_{ck} = 20$ MPa, praticamente todo o fundo está sujeito à fissuração. No entanto, grande parte dessa área está apenas na iminência de fissuração¹⁰.

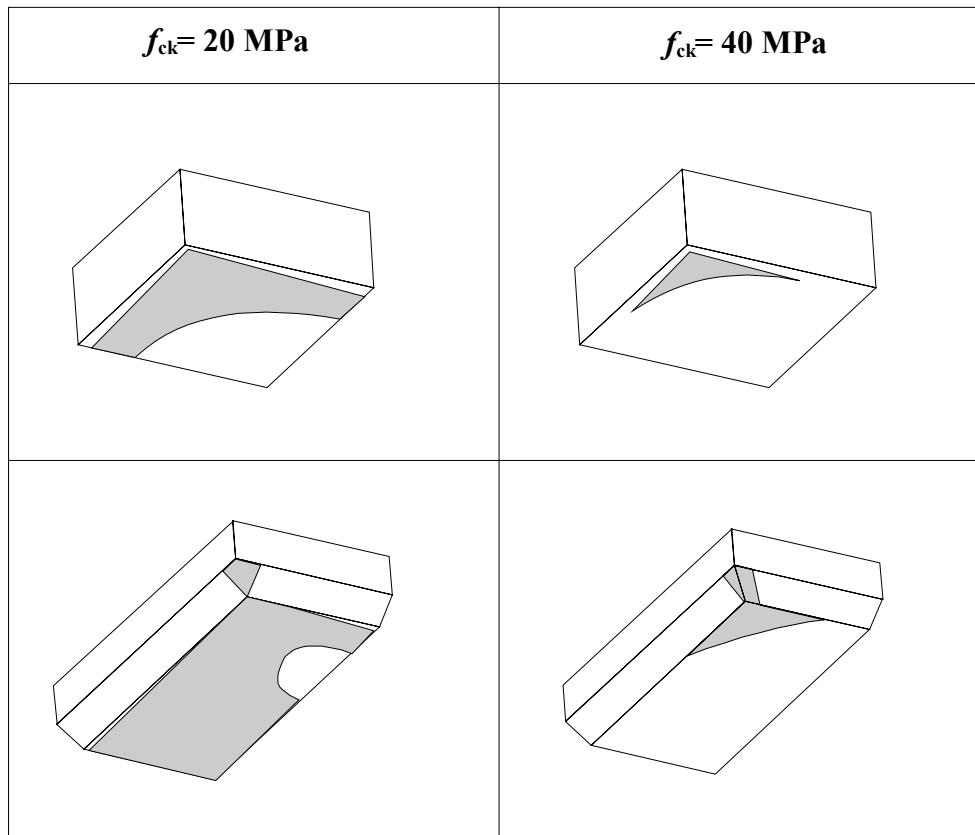
A elevação da resistência da argamassa melhora o desempenho da membrana reduzindo as áreas sujeitas à fissuração. No entanto, a relação entre a tensão máxima atuante e a resistência da argamassa não se altera muito — o que, em outras palavras, significa abertura de fissuras de mesma ordem de grandeza. A Tabela 5 mostra as zonas sujeitas à fissuração para este tipo de solicitação.

Como já foi dito, a análise feita aqui partiu de uma simplificação (adoção de uma contração de volume devido a redução de temperatura. Diversos fatores, tais como a variação do valor da resistência e do módulo de elasticidade ao longo do tempo, a redução da solicitação, bem como a associação de redução de temperatura com deformações de contração, não puderam ser investigados neste momento. Apesar da análise simplista, os resultados obtidos fornecem uma primeira idéia do comportamento da membrana sujeita a reduções de volume. Todavia tal efeito pode e deve ser melhor avaliado.

⁹ No reservatório de $10 \times 20 \text{ m}^2$ foi aplicada uma redução de 10 °C nos cantos para simular uma retração um pouco menor que no fundo (essas regiões são moldadas anteriormente ao fundo).

¹⁰ Além disso, deve-se lembrar que, devido à característica da solicitação, o surgimento de uma fissura dissipia energia, reduzindo as tensões na argamassa. Sendo assim, a peça provavelmente fissuraria e a região com tensões mais elevadas reduziria de tamanho.

Tabela 5 - Zonas propensas à fissuração na membrana sujeita a variações volumétricas



4.1.4 Recalques

Três foram as formas propostas para a simulação de recalques.

A primeira consiste na imposição de deformações à membrana. Ao se aplicar uma carga no solo (por exemplo, o carregamento provocado pela cobertura de um reservatório, transmitido ao solo por meio de uma sapata flexível) ele se deforma (vide Figura 5a). Através dos procedimentos disponíveis na teoria de Mecânica dos Solos pode-se obter uma estimativa dessas deformações, denominada de perfil de recalques. Conhecendo-se este perfil, impõe-se essas deformações à membrana a fim de estudar o seu comportamento.

A segunda forma de simulação baseia-se na idéia de falta de apoio sob a membrana associada à ação hidrostática. Neste caso, supõe-se que a falta de apoio seria decorrente de uma falha localizada na compactação da base, somada a uma lixiviação do solo, ou a um recalque deste.

A terceira hipótese é praticamente uma decorrência da primeira, pois, a partir de um perfil de recalques, pretendeu-se estudar o efeito do enrijecimento provocado pela disposição de uma sapata de espessura variável, e inversa ao referido perfil, na região de influência dos recalques. Seriam duas as funções dessa variação gradual de espessura: evitar a concentração elevada, e consequente fissuração, nas regiões de ligação entre membrana e sapata (onde existiria uma variação brusca de espessura), além de reduzir os esforços aplicados ao solo devido ao aumento da área de aplicação do carregamento. A disposição dessa sapata pressupõe o conhecimento das deformações provocadas por recalque, uma vez que a sapata

deverá ser disposta na região de influência do referido perfil. A Figura 5b esquematiza a configuração dessa sapata. Neste caso, em virtude da maior rigidez da sapata, durante a simulação impôs-se somente o valor do recalque máximo, pois a imposição do perfil completo ocasionaria o surgimento de esforços absurdos, que não correspondem à situação real.

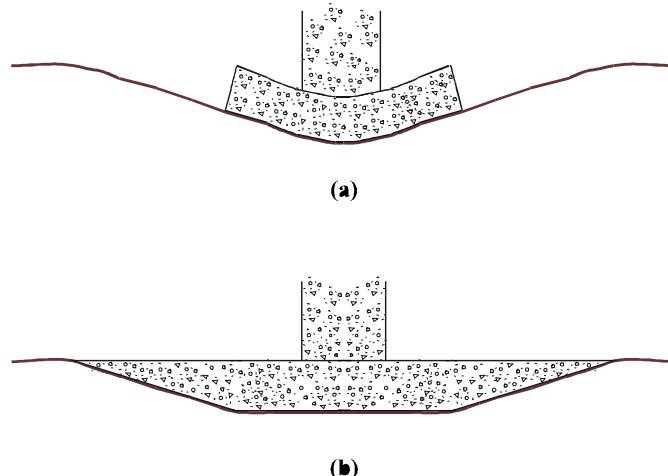


Figura 5 - (a) perfil de recalques decorrente da atuação do pilar; (b) sapata de espessura variável acompanhando o perfil de recalque anterior

As dimensões dos reservatórios adotados anteriormente eram relativamente pequenas, dispensando a existência de pilares ou provocando um carregamento muito pequeno em função do reduzido peso da cobertura. Em virtude disso, aumentou-se as dimensões do reservatório a ser simulado. A forma e a profundidade deste novo modelo são idênticas à do reservatório maior utilizado anteriormente, diferindo apenas nas dimensões em planta: agora $15 \times 30 \text{ m}^2$.

Os recalques máximos obtidos do perfil e aplicados à estrutura foram de 0,11 cm, para apoio em areia, e 0,97 cm, para argila.

O perfil de recalques foi obtido através da solução de Boussinesq.

A hipótese que forneceu resultados mais coerentes foi a terceira: sapata com espessura variável na região de influência dos recalques. A imposição de deformações à membrana gerou um nível de tensões muito elevado, chegando mesmo a ser inadmissível. No caso de apoio em areia, essa hipótese mostrou tensões mais elevadas até que a suposição de falta de apoio sob a membrana

Na verdade, nem a primeira nem a segunda hipótese correspondem ao que ocorre na prática. Uma situação real seria intermediária entre as duas: o solo recalcaria deixando a membrana sem apoio; ela não acompanharia exatamente essa deformação — uma vez que não estava solidamente vinculada a ele —, mas se deformaria livremente até encontrar novamente o apoio no solo. Tal situação é de difícil simulação, uma vez que o programa computacional utilizado não possibilita um controle de deformações. Mesmo não sendo as hipóteses mais realistas, algumas conclusões relativas ao comportamento da membrana puderam ser tiradas.

Como era de se esperar, a sapata desenvolve tensões mais elevadas em virtude da sua maior rigidez. No entanto, esses valores seriam tomados para o dimensionamento da sua armadura, não estando diretamente relacionados ao comportamento da membrana em si. No caso de apoio em areia, as tensões se mantêm abaixo da resistência à tração do material, não ocorrendo, portanto, a fissuração da membrana. Já para a argila, ocorreriam fissuras em regiões paralelas aos lados da sapata, um pouco além do encontro sapata/membrana — essa região corresponderia à zona de inflexão da membrana quando da sua deformação. Devido à proximidade das sapatas adjacentes, as linhas de isotensão se intercruzam, elevando as tensões na membrana e, consequentemente, aumentando a área das zonas sujeitas à fissuração.

Sem o enrijecimento da sapata, o efeito de recalques tende a ser mais localizado — daí as tensões serem muito elevadas. Quanto menor a deformabilidade do solo, menor será a zona de influência destas tensões. Neste caso, a ordem de grandeza destas tensões também é mais baixa. E isto se justifica pelas condições de vinculação: os recalques são maiores em argilas. Consequentemente, as deformações são maiores, gerando tensões mais elevadas; a membrana de argamassa armada se deforma na região cujo apoio é deficiente, distribuindo as tensões para as regiões adjacentes mas, sendo o solo mais deformável, ocorrerão ainda tensões que necessitam ser distribuídas, o que expande a área de influência dos recalques ocorridos.

4.2 Proposta de dimensionamento à flexão

No caso de reservatórios, a situação crítica corresponde ao Estado Limite de Utilização, pois há a necessidade de garantir um bom funcionamento da estrutura — o que corresponde a se falar em estanqueidade e durabilidade. Dessa forma, deve-se então dimensionar a armadura de modo que ela garanta uma abertura de fissura tal que não prejudique o funcionamento do reservatório.

A NBR-11.173 indica a seguinte expressão para o cálculo da abertura de fissuras devidas a solicitações normais, especificamente no caso de telas de aço soldadas com fios paralelos ao eixo da peça:

$$w = 1,658 \cdot s \cdot \varepsilon_s \quad (7)$$

sendo:

$$\begin{aligned} s &= s_1 && \text{se } s_1 \geq e \\ s &= 1,8s_1 && \text{se } 1,8s_1 < e \\ s &= e && \text{se } 1,8s_1 > e \quad e \quad s_1 < e \end{aligned}$$

$$s_1 = 1,5 \cdot \left(c + \frac{\phi}{2} \right) + 0,16 \cdot \frac{\phi}{\rho_r}$$

$$\varepsilon_s = \frac{1}{E_s} \cdot \left[\sigma_s - \frac{1}{2} \cdot \frac{f_{tk}}{\rho_r} \right]$$

onde:

- s - espaçamento entre fissuras
- s_1 - espaçamento de referência entre fissuras
- e - espaçamento entre os fios da tela que são transversais ao eixo da peça
- E_s - módulo de deformação longitudinal do aço
- ε_s - deformação média da armadura mais tracionada da seção
- σ_s - tensão em serviço da armadura
- f_{tk} - resistência característica da argamassa à tração
- ρ_r - taxa geométrica de armadura ($= A_s/A_c$ de acordo com a NBR-6118)
- ϕ - diâmetro do fio da tela na direção do eixo da peça
- c - cobrimento da armadura

Basta então estabelecer um valor limite para a abertura de fissuras e, a partir dele, calcular a deformação da armadura mais tracionada da seção. Por compatibilidade do diagrama de deformações obtém-se as deformações nas outras armaduras e, por equilíbrio de forças na seção, o momento resistente do arranjo. O valor limite adotado para abertura de fissura foi de 0,1 mm¹¹ (indicado pela NBR-11.173 para ambientes agressivos). As Tabelas 6 e 7 indicam os resultados do dimensionamento.

É importante salientar que o dimensionamento feito aqui é particular aos casos adotados para a análise. No entanto, eles podem servir como indicativo para outros casos.

Com relação ao dimensionamento e ao estabelecimento de especificações construtivas, algumas observações podem ser feitas:

- a) Na medida do possível especificar arranjos diferentes, mas com o mesmo tipo de tela. Tal atitude proporciona economia — pois será menor a quantidade de sobras provenientes dos cortes de telas —, além de reduzir a probabilidade de erros no momento da execução;
- b) Procurar manter uma uniformidade na distribuição dos arranjos (também por motivos executivos);
- c) Na região dos cantos ocorrerá um acúmulo de telas a serem traspassadas. Poder-se-ia sugerir a suspensão de algumas delas, quando do detalhamento, pois nestas regiões ocorre um decréscimo dos momentos fletores — mas é necessário fazer a verificação do momento resistente da seção resultante frente ao momento fletor atuante¹²;
- d) Quando houver traspasse de armadura numa direção, pode ocorrer acúmulo de fios na outra. Neste caso, poder-se-ia proceder ao corte dos fios excedentes nas proximidades dos pontos de solda.

¹¹ É preciso lembrar que a pintura proporciona uma proteção extra. SILVA(1995) afirma que a pintura em epóxi é capaz de vedar fissuras pré-existentes de até 0,1 mm.

¹² Não esquecer, no entanto, que a região dos cantos é crítica para o caso dos esforços provenientes da retração.

Tabela 6 - Dimensionamento para a membrana não enrijecida ($h=25\text{mm}$) apoiada em argila((a) e (c)) e areia (b)

 1 EQ98 3 ou 4 EL126 (arranjos 4 ou 5 c/ direção principal perpendicular à borda)	 1 EQ98 3 EQ98 (arranjo 5) ou 3 EL126 c/ direção principal perpendicular à borda	 1 EQ98 3 ou 4 EL126 (arranjos 4 ou 5 c/ direção principal perpendicular à borda)
 30/30 30/30 30/30 30/30	 50/50 30/30 30/30 30/30	 30/30 50/50 50/50 50/50

Tabela 7 - Dimensionamento para a membrana enrijecida ($h=25\text{mm}$ e $h_{ij}=45\text{mm}$) apoiada em argila((a) e (c)) e areia (b)

 1 EQ98 4 EQ120 (arranjo 4, p/ $f_{ck}=40 \text{ MPa}$ devem ser acrescentados fios de 3,2 mm espacados de 10 cm) ou 4 EL126 c/ direção principal perpendicular à borda (arranjo 1)	 1EQ98 -p/ $f_{ck}=40 \text{ MPa}$; 2 EQ98 (todo em armadura mínima) -p/ $f_{ck}=20 \text{ Mpa}$; 3 EQ120 = $\phi 3,2 \text{ mm c/ } 10 \text{ cm}$ = (só p/ $f_{ck}=20 \text{ Mpa}$)	 1 EQ98 -p/ $f_{ck}=40 \text{ MPa}$; 2 EQ98 -p/ $f_{ck}=20 \text{ Mpa}$; 1 EQ98 4 EQ120 (arranjo 4) + $\phi 8 \text{ mm cd}$ 20 cm
 30/80 220/20 50/20 20/20	 80/80 20/20 20/20	 80/80 20/120/50

4.3 Procedimentos de projeto: indicações iniciais

a) Escolha do local da obra

Quando não se puder evitar a construção de reservatórios em solos com deformabilidade mais alta, é preciso que os cuidados, tanto na fase de projeto quanto na de execução, sejam redobrados. Pode-se também, conforme o caso, tentar reduzir a deformabilidade do apoio através de reforço aplicado ao terreno.

b) Zonas de solicitação

As zonas não sujeitas à fissuração ocupam, em geral, a maior parte da extensão dos reservatórios. Estas áreas, portanto, exigem apenas uma armadura mínima construtiva — o que propicia grande economia. Nas demais áreas há de se tomar providências para que a fissuração não ocorra ou, se ocorrer, mantenha-se dentro de limites toleráveis, que ainda garantam a consideração do reservatório como estanque.

Pode-se concluir da análise dos resultados que, em solos deformáveis, é necessário usar argamassas mais resistentes. Além disso, quanto menor o reservatório, maior a proporção de áreas com armadura e espessura mínimas.

c) Espessuras mínimas construtivas

A espessura mínima da membrana de argamassa armada não é determinada exclusivamente pela magnitude dos esforços solicitantes. É preciso atentar também para o aspecto construtivo, pois os fios da armadura, variáveis de acordo com o tipo de tela empregado, devem ser devidamente protegidos por um cobrimento adequado.

As telas soldadas mais empregadas em argamassa armada são EQ98, EQ120, e EL126, cujos diâmetros das barras são, respectivamente, 2,5 , 2,76 , e 2,0 mm.

As telas são fornecidas em tamanhos pré-fixados, sendo necessário, portanto, emendas para se obedecer às especificações de projeto. Nestas regiões as telas se sobrepõem, exigindo uma espessura maior. Por este motivo, essa região crítica é que determina a espessura mínima admissível. A Tabela 8 indica os valores de espessuras mínimas para os arranjos usuais de telas soldadas.

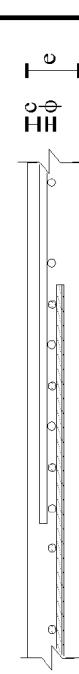
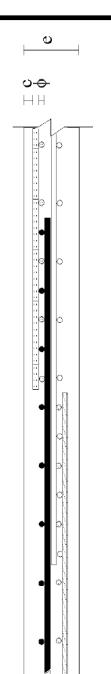
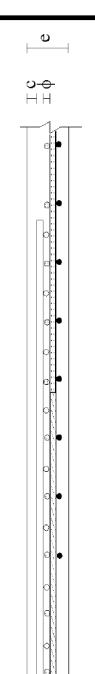
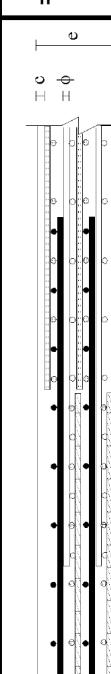
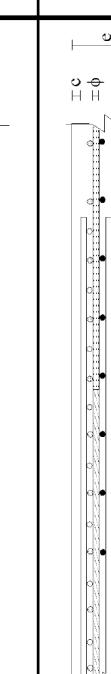
d) Existência de pilares

Quando o projeto exigir a cobertura do reservatório, sendo necessário pilares para suportá-la, alguns cuidados devem ser tomados.

Em primeiro lugar deve-se levantar o perfil de recalques provocado pela sapata, a fim de se determinar a sua área de influência. Ao longo desta, recomenda-se dispor uma sapata de espessura variável.

Em se tratando de solos deformáveis, como a argila, o espaçamento entre pilares deve ser tal a obedecer dois limites: grande o suficiente para evitar a sobreposição de tensões entre sapatas adjacentes — o que eleva demasiado os esforços na membrana; mas, por outro lado, pequeno o bastante para respeitar a baixa capacidade de carga do solo. A ordem de grandeza desses limites, variável de caso a caso, é determinada pelo tipo de solo de apoio e pelas dimensões do reservatório.

Tabela 8 : Espessuras mínimas para os arranjos usuais de telas soldadas

Nº de telas	Arranjo de malhas	Esquema	espessura	Tela			
				EQ98	EQ120	EL126	
			h(mm)	p(%)	h(mm)	p(%)	h(mm)
1	-		$=3\phi+2c+t$	25	0,39	25	0,48
2	sobrepostas		$=6\phi+2c+t$	30	0,65	30	0,80
2	desencontradas		$=4\phi+2c+t$	25	0,78	25	0,96
4	sobrepostas		$=11\phi+2c+t$	45	0,87	45	1,07
4	desencontradas		$=8\phi+2c+t$	35	1,12	40	1,20

* O primeiro valor corresponde à direção com abertura de malha de 2,5cm e o segundo àquele com 5,0 cm.

Um outro cuidado a ser tomado é não dispor pilares muito próximos às bordas e cantos, pois isto pode elevar ainda mais as tensões nessas áreas, podendo conduzir a valores demasiadamente altos. Além disso, nas regiões da membrana próximas à sapata deve-se prever um arranjo de armadura adequado para controlar a fissuração — através do aumento do número de telas ou a disposição de fios adicionais.

5 TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO

Duas são as técnicas empregadas para a execução da membrana de argamassa armada: moldagem no local e pré-moldagem parcial. Nesta última, apenas as paredes verticais e os seus enrijecedores constituem-se de placas pré-moldadas (que podem ser executadas no próprio canteiro de obras), enquanto os taludes e o fundo continuam sendo moldados na sua posição definitiva¹³. Uma outra diferença é a existência de pilaretes, que exercem a função de fixação e apoio das referidas placas. A moldagem no local pode ser feita manualmente — com o auxílio de uma colher de pedreiro e posterior vibração com vibradores de superfície adaptados — ou por projeção de argamassa.

Em linhas gerais, a sequência construtiva corrente engloba as seguintes etapas:

- a) preparação do terreno;
- b) execução da camada drenante;
- c) execução da membrana;
- d) construção da “prainha”;
- e) teste de desempenho;
- f) pintura.

Quanto à preparação do terreno, dois aspectos merecem atenção: deve-se evitar a construção sobre aterros (para evitar possíveis falhas e mesmo dificuldades de compactação) e preocupar-se com a forma de realizar a escavação. O uso de máquinas implica na obtenção de uma superfície irregular, além de exigir acessibilidade. Uma solução seria realizar um plano de escavação, deixando uma rampa de acesso. O corte final das superfícies, bem como a extração da rampa, seriam feitos manualmente.

O uso de concreto sem finos facilita a execução da camada drenante, devido à coesão provocada pela adição da pasta de cimento, viabilizando a construção de drenos verticais mesmo no sistema de moldagem no local.

Para a moldagem no local a etapa de execução da membrana divide-se em montagem das telas, lançamento e adensamento da argamassa. Já para a pré-moldagem parcial, esta fase engloba:

- montagem das placas verticais;
- concretagem dos pilaretes;

¹³ A facilidade construtiva justifica tal alternativa.

- colocação da armadura e moldagem do fundo e dos taludes;
- execução da “prainha”.

A moldagem *in loco* pode ser executada de duas formas: por lançamento manual ou por projeção de argamassa. A escolha do modo mais adequado depende de vários fatores, tais como porte da obra, custo, disponibilidade de materiais, equipamentos e mão-de-obra especializada.

O processo de projeção possibilita uma execução mais rápida, dispensa vibração (pois a própria velocidade de impacto e consistência resultam num material auto-adensável), reduz o número de juntas em virtude do aumento na velocidade de lançamento e proporciona uma maior confiabilidade quanto ao controle de qualidade da argamassa. O lançamento manual, apesar de mais lento, resulta em custo inferior pois, em países como o nosso, a mão-de-obra tem remuneração mais baixa.

WAINSHTOK(1992) alerta para uma desvantagem da projeção por via úmida: “devido à consistência fluida da argamassa, torna-se difícil aplicá-la em superfícies verticais ou muito inclinadas, onde o número de malhas seja relativamente pequeno”. A fim de contornar tal problema deve-se buscar aumentar a coesão da argamassa através da adição de sílica ativa ou fibras não-metálicas.

Se, por um lado, a projeção proporciona argamassas de melhor qualidade, por outro exige maiores cuidados na sua execução.

Os cuidados inerentes à fase de execução da membrana são:

- posicionar corretamente as telas, a fim de garantir o cobrimento especificado em projeto;
- durante a dobragem das telas, evitar o posicionamento da dobra próximo às regiões de solda, pois estas zonas são menos dúcteis, podendo ocasionar problemas quando a estrutura forposta em uso;
- cumprir fielmente o traço especificado para a argamassa, tendo em vista a garantia da trabalhabilidade e durabilidade da mesma;
- cuidar para que as pontas dos arames de amarração não excedam o cobrimento da armadura, favorecendo o processo de corrosão;
- não vibrar excessivamente a argamassa e atentar para que não ocorram vazios.

As estruturas em argamassa armada têm maior superfície exposta, maiores teores de cimento e relações água/cimento mais baixas, o que as torna mais suscetíveis aos efeitos nocivos decorrentes da retração. Portanto, para evitar a fissuração inicial é imprescindível a realização de uma cura cuidadosa, iniciada tão logo o endurecimento do material o permita. É fundamental que não se permita a rápida secagem da superfície após o término do período de cura, pois isto poderia provocar o surgimento de fissuras. A cura pode ser por imersão¹⁴, por aspersão¹⁵, por cobrimento da superfície com mantas, espuma ou areia constantemente umedecidas, a vapor e química¹⁶ (aplicando-se uma camada de material selante que impede a evaporação da água dos capilares presentes no concreto).

¹⁴ Aplicável somente a elementos pré-moldados.

¹⁵ Aspersões intermitentes não são recomendadas devido às contrações e dilatações alternadas.

¹⁶ A cura química é indicada para moldagens em clima frio, onde a cura com água é contra-indicada, em virtude da possibilidade de congelamento. Para o caso de reservatórios, seria necessária uma pré-evaliação de custos e de possíveis perdas de aderência à posterior pintura.

Apesar da pintura ser capaz de fechar microfissuras, não se deve contar com esse auxílio, sendo a estanqueidade do reservatório ou piscina inteiramente proporcionada pela membrana de argamassa.

Por este motivo, antes da pintura deve-se encher o reservatório e observar se não há fuga de água pelos drenos. Recomenda-se iniciar esse enchimento somente depois de decorridos 10 dias da última moldagem, além de ele ser feito lentamente (0,5m por dia), com observações constantes da saída dos drenos.

Verificada a eficiência do reservatório, ele deve ser esvaziado, seco, e só então pintado.

Até hoje, a pintura de reservatórios e piscinas tem sido considerada apenas como função estética. Tal posicionamento está absolutamente a favor da segurança, pois se desconsidera uma proteção que na realidade existe.

A pintura obstrui os poros superficiais do concreto e até mesmo fissuras de pequena abertura, impedindo, portanto, a penetração de elementos agressivos na argamassa. Em outras palavras: influencia diretamente a durabilidade da estrutura, desempenhando importante papel na proteção das armaduras.

Os tipos usuais de pintura utilizada em estruturas do gênero são a borracha clorada e a resina epóxi. Possuem alta aderência com concretos e argamassas, além de alta resistência a produtos químicos, mas são sensíveis aos raios ultravioleta, podendo surgir alterações de cor e ressecamento. Tal desvantagem é contornada com uma manutenção adequada, procedendo-se a uma repintura quando se fizer necessário.

Apesar de a boa aderência às argamassas ser característica dos materiais comumente utilizados como impermeabilizantes, não se deve descuidar de alguns cuidados essenciais à garantia de tal propriedade: o substrato a ser pintado deverá estar livre de umidade e isento de elementos que possam prejudicar a aderência entre os materiais, tais como poeira, graxas e óleos. Além disso, é essencial atender as recomendações de manuseio e estocagem fornecidas pelo fabricante do produto.

6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURABILIDADE

Tendo em vista especificamente o caso de argamassa armada aplicada em reservatórios e piscinas, algumas medidas para se aumentar a confiança na durabilidade da membrana podem ser:

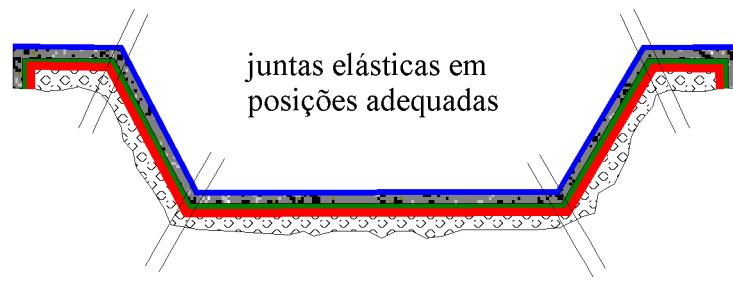
1. Melhorar a qualidade da argamassa: fazer uso de baixas relações água/cimento associado ao uso de superplastificantes (para aumentar a resistência e reduzir a permeabilidade e efeitos de retração), garantir uma compactação adequada através de uma boa vibração, adicionar pozolanas ou sílica ativa à mistura (visando a melhoria da coesão e da plasticidade da argamassa fresca, além da redução da porosidade e aumento da resistência do material endurecido), preferir a utilização de agregados de forma arredondada (para fins de aumento da plasticidade), além da possibilidade da modificação da argamassa com polímeros;

2. Controle da fissuração: por meio de armaduras de diâmetros menores e menos espaçados (conceito já inserido na própria definição de argamassa armada) ou

pela adição de fibras não metálicas. Outro expediente seria diminuir as restrições aos deslocamentos, através da previsão de juntas elásticas entre painéis de dimensões determinadas¹⁷ (vide Figura 6.1);

3. Proteção da superfície inferior: a fim de evitar o ataque de água e substâncias percoladas pelo filtro, pode-se dispor uma manta plástica ou uma membrana de impermeabilização entre a camada de regularização e a membrana de argamassa armada (vide Figura 6);

4. Proteção da superfície superior: como já foi dito anteriormente, a pintura com epóxi ou borracha clorada contribui para a durabilidade da estrutura. Um sistema construtivo que tem se destacado atualmente constitui-se de uma estrutura de alvenaria revestida por uma capa de vinil. Possivelmente, o mesmo conceito pode ser aplicado aos reservatórios em argamassa armada, aplicando-se este tipo de proteção à membrana;



- concreto magro ou sem finos
- argamassa pobre de regularização da camada de concreto sem finos (desempenada)
- manta de PVC com traspesses colados ou revestimento de poliuretano moldado no local
- membrana de argamassa armada
- revestimento externo

Figura 6 - Sugestões para se aumentar a confiança na durabilidade da estrutura

5. Manutenção adequada: ainda na fase de projeto devem ser previstas determinadas épocas para a repintura do revestimento, bem como os procedimentos ideais para executá-la. O mesmo procedimento deve ser adotado para a substituição do material das juntas elásticas;

¹⁷ Antes de serem utilizadas, deve ser feito um estudo sobre o seu desempenho, adesão com a argamassa da membrana, cuidados na execução, necessidades de manutenção e riscos de fissuração. Talvez esse fosse um bom tema a ser inserido em pesquisas futuras.

6. Uso de armaduras alternativas: tais armaduras podem ser telas de aço banhadas em epóxi ou armaduras não-metálicas. A primeira sugestão influencia diretamente o custo da estrutura, pois a pintura das telas o elevará, sendo necessária uma avaliação da relação custo/benefício. A segunda relaciona-se ao uso de fibras não-metálicas adicionadas à matriz. Tais fibras podem ser de polipropileno, PVC ou fibra de vidro resistente aos ácalis. Esta última, devido ao seu desempenho, poderia reduzir significativamente, ou mesmo eliminar, o uso de telas de aço — poderia então surgir a pergunta: mas, neste caso, não se estaria executando um material diferente da argamassa armada? A resposta é positiva, mas há de se situar a questão num contexto mais abrangente, no qual a Engenharia busca a solução de um problema (a impermeabilidade e durabilidade) visando o melhor desempenho em cada caso particular. E, para um mesmo problema, podem existir várias soluções...

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo suporte financeiro.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1989). **ACI 549.1R-88 - Guide for the design, construction , and repair of ferrocement**. Detroit, USA. 27p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 6118 - Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1989). **NBR 11173 - Projeto e execução de argamassa armada**. Rio de Janeiro.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. (1976). **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo, Edgard Blücher/Ed. da Universidade de São Paulo.
- PANIAGO, D.G. (1998). **Análise estrutural de reservatórios enterrados de argamassa armada com telas de aço soldadas**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SILVA, P.F.A. (1995). **Durabilidad das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. São Paulo, Pini.
- WAINSHTOK RIVAS, H. (1992). **Ferrocemento: diseño y construcción**. La Habana, Félix Varela.