



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**DEMÓSTENES COUTINHO GOMES**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE  
TENSORES DE FÔRMAS PARA RESERVATÓRIOS DE  
CONCRETO**

Uberlândia, (2020)

**DEMÓSTENES COUTINHO GOMES**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE  
TENSORES DE FÔRMAS PARA RESERVATÓRIOS DE  
CONCRETO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientadora: Profª. Doutora Maria Cristina Vidigal de Lima

Coorientador: Prof. Pós-doutor Rondinele Alberto dos Reis Ferreira

Uberlândia, (2020)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.**

---

G633a

2020

Gomes, Demóstenes Coutinho, 1982-

Análise experimental do desempenho de tensores de fôrmas para reservatórios de concreto [recurso eletrônico] / Demóstenes Coutinho Gomes. - 2020.

Orientadora: Maria Cristina Vidigal de Lima.

Coorientador: Rondinele Alberto dos Reis Ferreira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3019>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Lima, Maria Cristina Vidigal de, 1970-, (Orient.). II. Ferreira, Rondinele Alberto dos Reis, 1984-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

---

CDU: 624

Rejâne Maria da Silva – CRB6/1925



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 256, PPGECE				
Data:	08 de julho de 2020	Hora de início:	9:10h	Hora de encerramento:	11:52h
Matrícula do Discente:	11812ECV004				
Nome do Discente:	Demóstenes Coutinho Gomes				
Título do Trabalho:	Análise experimental do desempenho de tensores de fôrmas para reservatórios de concreto				
Área de concentração:	Estruturas e Construção civil				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo do comportamento de elementos estruturais industrializados				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelas Professoras Doutoras: Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho – CEATEC/PUC-Campinas, Vanessa Cristina de Castilho – FECIV/UFU e Maria Cristina Vidigal de Lima – FECIV/UFU orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Maria Cristina Vidigal de Lima, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

### Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Cristina Vidigal de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/07/2020, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Cristina de Castilho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/07/2020, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho, Usuário Externo**, em 08/07/2020, às 12:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2091109** e o código CRC **F7B12E40**.

*Dedico este trabalho a minha amada esposa Cláudia e minha amada filha Bella.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Hashem, Criador e Único para mim. Agradeço à minha família, especialmente à minha querida esposa Cláudia Dias, luz em meus dias mais escuros, amor de minha vida, que me deu meu presente mais lindo e maravilhoso, minha amada filha Bella Candelori. Vocês são meus motivos para continuar.

Muito obrigado a minha amada mãe, Dejandira Coutinho e meu pai Demóstenes Gomes (*in memoriam*) e todos os meus irmãos que sempre me ajudaram, especialmente meu irmão caçula Heráclito e também minha cunhada Nágela por todo apoio e ajuda decisiva que permitiu que este trabalho fosse concluído.

Em especial agradeço ao meu sogro Otaviano Lopes, cujo conhecimento e sabedoria me norteou durante a pesquisa.

Agradeço minha orientadora, Professora Doutora Maria Cristina, pela enorme paciência, por todas instruções e inestimáveis contribuições que resultaram na construção deste trabalho.

Agradeço ao Professor Pós-Doutor Rondinele pela paciência, por todas as explicações e contribuições, especialmente na fase de planejamento e elaboração da parte escrita do trabalho.

À Professora Pós-Doutora Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho e à Professora Doutora Vanessa Cristina de Castilho pelas contribuições e sugestões de melhoria.

Agradeço à empresa Brasmix – Engenharia de Concreto SA por todas informações e insumos fornecidos.

Meu obrigado ao Consórcio BT CONVAP COMPLETA (BCC), responsável pela execução da obra de captação do sistema de água capim branco em Uberlândia-MG, uma obra de grande vulto e enorme relevância no cenário do saneamento local e nacional. Agradeço a todos os profissionais envolvidos por todo compartilhamento de conhecimentos, pela permissão de visitas ao canteiro de obras e pelo fornecimento de dados técnicos e experiências práticas que contribuíram para a formulação teórica e elaboração dos experimentos.

Agradeço especialmente ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia (DMAE) e a todos os servidores desta importante autarquia que sempre ocupa posições de destaque nos rankings de saneamento do País, por todo o apoio pela constante troca de informações, por todos os equipamentos disponibilizados e por me realizar profissionalmente.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, nossa querida UFU, por toda a inegável contribuição a todo Brasil, entidade que transformou muitas vidas, especialmente a minha.

Minha gratidão à CAPES, importante unidade de fomento à pesquisa no País, que viabilizou várias pesquisas de amigos e colegas do curso, especialmente pelo fornecimento de equipamentos e materiais que foram decisivos para o aprendizado durante todo o curso. Apesar de não ter elaborado a pesquisa como bolsista da instituição, reconheço que sem o apoio prestado ao longo dos anos não seria viável a conclusão do trabalho.

Meu grande agradecimento em forma de abraço a todos os meus colegas de curso por todos os momentos, desejo sucesso a todos ao mesmo tempo que me coloco à disposição.

Gratidão eterna por todos que não soltaram minha mão nos momentos mais decisivos. Sem vocês, nada teria sentido...

Meu sincero muito obrigado!

Gomes, D.C. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE TENSORES DE FÔRMAS PARA RESERVATÓRIOS DE CONCRETO, 130 p., Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

## RESUMO

A percolação de água em reservatórios de concreto é o principal agente causador de patologias e o maior responsável pela diminuição da vida útil destas estruturas. Este trabalho se dedica a estudar as patologias e os efeitos da percolação de água em reservatórios de distribuição moldados *in loco*, especialmente nas regiões onde são instalados os tensores de fôrmas, que se trata de um ponto crítico de infiltração de água. O estudo propõe modelos experimentais que descrevem o comportamento de profundidades de penetração de água em diferentes tensores, tais como: com barra chata e neoprene e com barra roscada e luva fendida. Os ensaios realizados foram planejados utilizando-se o delineamento composto central rotacional. As variáveis analisadas para quantificação da penetração de água foram pressão e tempo, validadas com erro menor que 5% em relação aos valores preditos no modelo e observados no experimento. Os resultados mostram que o tensor de barra chata teve o pior desempenho, pois aumentou a infiltração de água na estrutura em 146,62% e o tensor de barra roscada acarretou o aumento da percolação de água em 104,01%, em relação à situação experimental mais crítica. O estudo apresenta dados que mostram a infiltração de água em relação à pressão, tempo e tipo de tensor. A análise destes dados pode ser utilizada na melhoria do desempenho destas peças.

**Palavras-chave:** Reservatórios de distribuição – Tensores de fôrmas – Vedação – Penetração de água – Planejamento estatístico

## ABSTRACT

The percolation of water in concrete reservoirs is the main causative agent of pathologies and the main responsible for reducing the useful life of these structures. This work is dedicated to studying the pathologies and the effects of water percolation in distribution reservoirs molded *in loco*, especially in the regions where the formwork tensioners are installed, which is a critical point of water infiltration. The study proposes experimental models that describe the behavior of water penetration depths in different tensioners, such as with flat bar and neoprene and with threaded bar and split sleeve. The tests performed were planned using the central rotational composite design. The variables analyzed to quantify water penetration were pressure and time, validated with an error of less than 5% in relation to the values predicted in the model and observed in the experiment. The results show that the flat bar tensioner had the worst performance, as it increased the water infiltration in the structure by 146.62% and the threaded bar tensioner caused the water percolation increase by 104.01%, in relation to the most critical experimental situation. The study presents data that show the infiltration of water in relation to pressure, time and type of tensor. The analysis of this data can be used to improve the performance of these parts.

**Keywords:** Distribution reservoirs – Formwork tensioners – Sealing – Water penetration – Statistical planning

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ocorrência de patologias: (a) distribuição da patologia armadura exposta em relação aos elementos estruturais (%); (b) vista interior de um reservatório.....	25
Figura 2 – Tensores utilizados para travamento de fôrmas paralelas: (a) instalação de tensores de barra rosada durante a execução de paredes de reservatório de concreto; (b) tensor de barra chata nas paredes de um reservatório apoiado após sua execução .....	25
Figura 3 - Patologias ocasionadas por percolação de água na estrutura: (a) infiltração de água em região de instalação de tensores; (b) demolição da parte deteriorada da estrutura.....	26
Figura 4 - Aumento do custo da intervenção em relação ao tempo de tomada de decisão .....	27
Figura 5 - Fluxograma de ações e reparos de patologias em estruturas .....	29
Figura 6 - Penetração de íons de cloro no teto do reservatório .....	32
Figura 7 - Principais patologias analisadas .....	33
Figura 8 - Patologias encontradas pelos autores: (a) rachaduras e solturas de partes; (b) lixiviações nas paredes do reservatório .....	34
Figura 9 - Fluxograma de patologias em reservatórios de Cascavel-PR .....	35
Figura 10 – Patologias encontradas pelos autores: (a) patologias no revestimento; (b) armadura exposta no teto do reservatório por ação de íons de cloro.....	36
Figura 11 - Patologias em reservatório elevado: (a) problemas no revestimento e juntas de concretagem; (b) estrutura de sustentação do reservatório.....	37
Figura 12 - Ocorrência de patologias em reservatórios no Rio Grande do Norte .....	39
Figura 13 - Soluções construtivas propostas por Tonico e Moraes (2011) .....	39
Figura 14 - Patologias em reservatório apoiado: (a) execução inadequada de míscula na junção fundo-parede; (b) junta de concretagem inadequada e vazamento de água através de fixadores .....	41
Figura 15 - Reparo de estrutura de concreto armado com a utilização de resina époxi .....	45
Figura 16 - Reparo de rachadura utilizando método de abertura e vedação de junta.....	46
Figura 17 - Método de execução de reparos de corrosão e impermeabilização superficial ....	47
Figura 18 - Método construtivo tradicional de execução de fôrmas de madeira em paredes de reservatórios: (a) esquema geral de construção; (b) detalhe do fixador que pode ser recuperado após a concretagem.....	55
Figura 19 - Luvas de vedação de água executadas em fixadores de fôrmas de concreto: (a) vista externa da luva de vedação; (b) vista interna da luva e encaixe do fixador de fôrmas .....	56

Figura 20 - Tensor metálico perdido para fôrmas paralelas e método de vedação de passagem de água com neoprene .....	56
Figura 21 - Fôrma mista de madeira e estrutura metálica .....	57
Figura 22 - Método de execução e componentes de forma deslizante .....	57
Figura 23 - Método executivo de execução de junta de concretagem.....	59
Figura 24 - Sistemas de junção entre lajes de fundo e de cobertura com paredes do reservatório: (a) junção entre parede de concreto e laje de cobertura; (b) junção entre laje de piso e parede de concreto .....	60
Figura 25 - Junção entre lajes e paredes com juntas de vedação de água .....	61
Figura 26 - Sistema de injeção de gel acrílico polimérico em reservatórios: (a) bico de adesão em áreas externas; (b) bico de perfuração em áreas internas expostas à umidade e pressão ...	62
Figura 27 - Sistema de escoamento superficial de águas pluviais em tampas de reservatórios de concreto: (a) escoamento através de condutor vertical; (b) escoamento superficial com utilização de pingadeira.....	62
Figura 28 - Danos ocasionados por percolação de água na estrutura: (a) ruína estrutural do concreto; (b) corrosão de armaduras .....	65
Figura 29 - Montagem do experimento: (a) corpo de prova de referência sem tensor (ST); (b) corpo de prova com tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV); (c) corpo de prova com barra roscada e vedação com luva fendida (RV); (d) dimensões do corpo de prova e esquema de aplicação de água potável sob pressão.....	70
Figura 30 - Tensores utilizados no experimento: (a) Tensor de barra chata com neoprene; (b) tensores de barra roscada com luvas fendidas .....	71
Figura 31 - Fôrmas dos corpos de prova do experimento: (a) fôrmas para moldagem de corpos de prova de referência e corpos de prova com tensores de barra chata e vedação com neoprene; (b) corpos de prova com tensores de barra roscada e vedação com luvas fendidas .....	71
Figura 32 - Corpos de prova do experimento: (a) moldagem dos corpos de prova; (b) identificação dos corpos de prova .....	72
Figura 33 - Sistema de aplicação de pressão no elemento estrutural: (a) bancada de hidrometria e manômetros; (b) adaptação de tubulação para engate no corpo de prova e aplicação de pressão .....	73
Figura 34 - Montagem e execução do ensaio: (a) manômetro para controle e medição de pressão aplicada; (b) montagem dos corpos de prova e detalhe da aplicação de pressão .....	74
Figura 35 - Compressão e ruptura dos corpos de prova: (a) corpo de prova de referência, sem tensor; (b) corpo de prova com tensor de barra chata e vedação com neoprene; (c) corpo de	

prova com barra roscada e luva fendida; (d) ruptura do corpo de prova sem tensor; (e) ruptura do corpo de prova com tensor de barra chata; (f) corpo de prova de barra roscada rompido ..	75
Figura 36 - Método utilizado para medição da máxima profundidade de penetração de água nos corpos de prova: (a) corpo de prova sem tensor ST-P20-T48/2; (b) corpo de prova com tensor de barra chata e vedação com neoprene CV-P20-T48/1; (c) corpo de prova com barra roscada e luva fendida RV-P27-T44/1 .....	76
Figura 37 - Diagramas de Pareto: (a) concreto de referência sem tensor; (b) tensor com barra chata e vedação com neoprene; (c) tensor de barra roscada e vedação com luva fendida .....	85
Figura 38 - Superfície de resposta do concreto de referência sem tensor (ST): (a) representação espacial; (b) representação no plano.....	87
Figura 39 - Superfície de resposta do tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV): (a) representação espacial; (b) representação no plano.....	87
Figura 40 - Superfície de resposta do tensor de barra roscada e vedação com luva fendida (RV): (a) representação espacial; (b) representação no plano .....	88
Figura 41 - Relação entre valores preditos e observados: (a) concreto de referência sem tensor; (b) tensor de barra chata e vedação com neoprene; (c) tensor de barra roscada e vedação com luva fendida .....	90
Figura 42 - Profundidade máxima de penetração de água na estrutura com a aplicação de pressão de 30 m.c.a. durante 24 horas .....	92
Figura 43 - Desempenho dos tensores em relação às combinações de pressão e tempo.....	93
Figura 44 - Penetração de água no tensor de barra roscada com luva fendida.....	94
Figura 45 - Penetração de água no tensor de barra chata e vedação com neoprene .....	94
Figura 46 - Variáveis analisadas na mensuração do formato de penetração: (a) concreto sem tensor; (b) concreto com tensor .....	95
Figura 47 - Formato da percolação de água no concreto de referência sem tensor: (a) corpo de prova ST-P12-T27/1; (b) corpo de prova ST-P27-T44/2 .....	96
Figura 48 - Formato da percolação de água no tensor de barra chata e vedação com neoprene: (a) corpo de prova CV-P12-T27/3; (b) corpo de prova CV-P27-T44/3 .....	97
Figura 49 - Formato da percolação de água no tensor de barra roscada e vedação com luva fendida: (a) corpo de prova RV-P12-T27/2; (b) corpo de prova RV-P27-T44/1 .....	97
Figura 50 - Vazamentos em reservatório de concreto apoiado: (a) parede externa; (b) parede interna .....	98
Figura 51 - Vazamentos em reservatório de concreto semienterrado: (a) parede externa; (b) parede interna .....	99

Figura 52 - Vazamentos em tensores reservatório de concreto apoiado ..... 100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de reservatórios de distribuição .....	21
Tabela 2 - Patologias observadas em reservatórios do Estado de São Paulo .....	24
Tabela 3 - Principais causas de patologias em estruturas no Brasil no ano de 2003 .....	30
Tabela 4 - Principais causas de patologias em estruturas de concreto no Brasil em 2017 .....	31
Tabela 5 - Patologias observadas em reservatórios da cidade de Pelotas .....	38
Tabela 6 - Problemas de degradação no concreto e métodos construtivos de correção .....	48
Tabela 7 - Problemas de corrosão de armaduras e métodos construtivos de correção.....	49
Tabela 8 - Definição e ocorrência de patologias na estrutura global, concreto e aço .....	50
Tabela 9 - Especificações dos materiais de acordo com as características da estrutura.....	58
Tabela 10 - Material usado na estrutura com $f_{ck}$ de 50 MPa aos 28 dias, para 1 m <sup>3</sup> de concreto .....	59
Tabela 11 - Descrição das variáveis utilizadas no experimento .....	66
Tabela 12 - Decodificação dos valores teóricos em relação aos valores experimentais .....	68
Tabela 13 - Matriz do experimento em função de variáveis codificadas e não codificadas ....	69
Tabela 14 - Concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova.....	72
Tabela 15 - ANOVA com dois fatores .....	78
Tabela 16 - Profundidades máximas de penetração medidas no laboratório .....	81
Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) para as variáveis independentes pressão e tempo .....	82
Tabela 18 - Coeficientes de determinação dos modelos experimentais .....	83
Tabela 19 - Análise dos efeitos em função das variáveis independentes. ....	84
Tabela 20 - Penetrações máxima de água preditas pelos modelos experimentais com pressão de 30 m.c.a aplicada durante 48 horas.....	88
Tabela 21 - Validação do modelo para o concreto sem tensor na situação mais crítica do ensaio .....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS

$(\tau\beta)ij$	- efeito da interseção entre $\tau_i$ e $\beta_j$ ;
$\xi_i$	- variável independente do modelo
DF	- graus de liberdade
$EP(\tilde{Y})$	- erro padrão do efeito
f	- função de que define a superfície de resposta.
F	- teste Fischer de significância dos efeitos de variação
h	- horas
$H_0$	- hipótese nula;
$H_0(A)$	- hipótese nula para o fator A;
$H_0(AB)$	- hipótese nula para a interação entre os fatores A e B;
$H_0(B)$	- hipótese nula para o fator B;
$H_1$	- hipótese alternativa
k	- variáveis independentes
MS	- média dos quadrados
n	- tamanho da amostra
p	- teste de valor-p
p	- pontos centrais
P	- pressão
$R^2$	- coeficiente de determinação
SS	- soma dos quadrados
$\beta$	- vetor de coeficientes do modelo
tp	- efeitos padronizados
$V_k$	- fator índice k que influencia na variável resposta;
X	- matriz do planejamento experimental
$X_1$	- variável pressão codificada
$X_2$	- variável tempo codificada
$X_i$	- pontos de análise das variáveis
$X^T$	- matriz transposta do planejamento experimental
$\hat{y}$	- profundidade máxima de penetração de água
Y	- vetor de valores obtidos no experimento
$y_1$	- profundidade média de penetração de água sob pressão do primeiro ensaio

$y_n$	- profundidade média de penetração de água sob pressão do n-ésimo ensaio
$\alpha$	- rotação do modelo
$\beta_0$	- constante do modelo
$\beta_1$	- constante do valor linear codificado da variável pressão
$\beta_{11}$	- constante do valor quadrático codificado da variável pressão
$\beta_{12}$	- constante do valor da interação entre as variáveis pressão e tempo
$\beta_2$	- constante do valor linear codificado da variável tempo
$\beta_{22}$	- constante do valor quadrático codificado da variável tempo
$\beta_j$	- efeito do j-ésimo nível do fator B;
$\varepsilon_{ijk}$	- erro aleatório ou experimental;
$\mu$	- média global da resposta;
$\tau_i$	- efeito do i-ésimo nível do fator A;
$\hat{Y}$	- valor do efeito e EP( $\hat{Y}$ )
$H_b$	- profundidade média de penetração nas bordas (cm);
$\theta_p$	- ângulo médio de penetração.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	- água/cimento
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	- <i>American Concrete Institute</i> (Instituto Americano de Concreto)
ANOVA	- Análise de Variância
CAERN	- Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
cm	- centímetros
CP III	- Cimento Portland de alto forno
CV	- corpo de prova com tensor de barra chata e vedação com neoprene
DMAE	- Departamento Municipal de Água e Esgoto
EN	- <i>European Norms</i> (Normas Europeias)
kg	- quilograma
m	- metros
m.c.a	- metros de coluna d'água
mm	- milímetros
MSR	- Método de Superfície de resposta
NBR	- Norma Brasileira
PCC	- Planejamento Composto Central
pH	- Potencial Hidrogeniônico
PVC	- policloreto de vinil
RV	- corpo de prova com barra roscada e vedação com luva fendida
Sabesp	- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANEP	- Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas
Sanepar	- Companhia de Saneamento do Paraná
ST	- corpo de prova de referência sem tensor
t	- tempo de aplicação de pressão
USA	- <i>United States of America</i> (Estados Unidos da América)

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	23
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	23
1.2	JUSTIFICATIVA.....	24
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	28
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>29</b>
2.1	ANÁLISE DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA MOLDADOS <i>IN LOCO</i> .....	29
2.2	PANORAMA DE PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS NO BRASIL.....	30
2.3	ANÁLISE DE PATOLOGIAS E TERAPIAS CONSTRUTIVAS EM RESERVATÓRIOS DE CONCRETO MOLDADOS <i>IN LOCO</i> .....	31
2.4	NORMAS NACIONAIS, INTERNACIONAIS E MÉTODOS DE ANÁLISE DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS .....	42
2.5	PRINCÍPIOS DE CIÊNCIAS DE MATERIAIS APLICADOS À SOLUÇÃO DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS DE CONCRETO .....	51
2.6	MÉTODOS CONSTRUTIVOS E TECNOLOGIAS DE PREVENÇÃO DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS DE CONCRETO .....	54
2.7	ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO .....	63
2.8	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	64
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
3.1	VARIÁVEIS ANALISADAS NO EXPERIMENTO.....	65
3.2	PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO E EXPERIMENTAL.....	66
3.3	MONTAGEM E EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO .....	69
3.4	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RESULTADOS.....	76
3.4.1	<i>Análise de variância (ANOVA) .....</i>	77
3.4.2	<i>Coeficiente de determinação (<math>R^2</math>) .....</i>	78
3.4.3	<i>Análise da estimativa dos efeitos .....</i>	79
3.4.4	<i>Superfície de resposta .....</i>	79
3.4.5	<i>Validação experimental.....</i>	79

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>81</b>
4.1	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS RESULTADOS .....	82
4.2	COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DOS MODELOS ( $R^2$ ) .....	83
4.3	ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS DOS EFEITOS DOS MODELOS .....	84
4.4	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DOS MODELOS .....	86
4.5	VALIDAÇÃO DOS MODELOS .....	89
4.6	ANÁLISE COMPARATIVA DOS EXPERIMENTOS .....	91
4.7	FORMATO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO .....	95
4.8	COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS EM RELAÇÃO À OBRAS EXECUTADAS .....	98
4.9	MELHORIA DO DESEMPENHO DOS TENSORES .....	100
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>102</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	103
	<b>APÊNDICE A – ENSAIO DE REFERÊNCIA, SEM TENSOR.....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE B – ENSAIO COM TENSOR DE BARRA CHATA E VEDAÇÃO COM NEOPRENE .....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE C – ENSAIO DO TENSOR DE BARRA ROSCADA E VEDAÇÃO COM LUVA FENDIDA.....</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICE D – ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE PRESSÃO NOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>113</b>
	<b>APÊNDICE E – CORPOS DE PROVA DO EXPERIMENTO .....</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE F – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA NOS ENSAIOS DO CONCRETO DE REFERÊNCIA SEM TENSOR .....</b>	<b>115</b>
	<b>APÊNDICE G – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA NOS ENSAIOS DO TENSOR DE BARRA CHATA E VEDAÇÃO COM NEOPRENE .....</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE H – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA NOS ENSAIOS DO TENSOR DE BARRA ROSCADA E VEDAÇÃO LUVA FENDIDA .....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE I – COEFICIENTES DE REGRESSÃO .....</b>	<b>118</b>
	<b>APÊNDICE J – ENSAIO DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS .....</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXO A – DOSAGEM DO CONCRETO DE REFERÊNCIA .....</b>	<b>122</b>
	<b>ANEXO B – ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO NO CONCRETO DE REFERÊNCIA .....</b>	<b>123</b>
	<b>ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TENSOR DE BARRA CHATA E VEDAÇÃO COM NEOPRENE .....</b>	<b>129</b>

**ANEXO D – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TENSOR DE BARRA ROSCADA E  
VEDAÇÃO COM LUVA FENDIDA.....130**

## 1 INTRODUÇÃO

Reservatórios de distribuição de água são estruturas que estão presentes em todo o sistema de abastecimento de água tratada do País. Segundo Azevedo Netto e Fernandez (2015) os reservatórios de distribuição são estruturas extremamente importantes para o abastecimento urbano de água, pois sua função não se restringe apenas ao armazenamento de água. Estas estruturas são responsáveis pelo atendimento de demandas emergenciais de fornecimento de água, variações corriqueiras de consumo e podem manter a pressão de água na rede de acordo com as condições operacionais planejadas. O desempenho dos reservatórios é preponderante no êxito do abastecimento de água, pois falhas nestas estruturas ocasionam graves problemas de desabastecimento para toda a sociedade.

O crescimento urbano apresenta demanda crescente de abastecimento de água e requer a execução de reservatórios de distribuição que apresentem melhor desempenho. Os métodos construtivos e a classificação deste tipo de estrutura são variados. De acordo com Azevedo Netto e Fernandez (2015) estas estruturas podem ser classificadas por intermédio do seu método construtivo, de acordo com Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de reservatórios de distribuição

<b>Tipo de Reservatório</b>	<b>Característica construtiva</b>
Enterrado	Altura da lâmina d'água abaixo do nível do terreno
Semienterrado	Apenas parte da água armazenada abaixo do nível do terreno
Apoiado	Fundo do reservatório apoiado na superfície do terreno
Elevado	Instalado sobre sistema estrutural acima do nível do terreno
Stand pipe	Estrutura elevada, com perímetro da seção transversal contínua

Fonte: Azevedo Netto e Fernandez (2015) adaptado.

Os reservatórios de distribuição são usualmente executados por meio de estruturas metálicas, estruturas pré-fabricadas de concreto e estruturas de concreto moldadas *in loco*. Apesar do método de execução *in loco* se apresentar como técnica construtiva atrativa, por contar com ampla disponibilidade materiais e mão de obra, este tipo de método construtivo merece especial

atenção, pois se observa que sua utilização resulta em muitos defeitos construtivos e anomalias estruturais.

Muitos problemas operacionais de reservatórios de concreto moldados *in loco* são ocasionados na fase de construção, pois alguns procedimentos construtivos e materiais utilizados na execução destas obras permitem a percolação de água no interior da estrutura, o que ocasiona problemas patológicos, anomalias estruturais e diminuição da vida útil deste tipo de edificação. O estudo destes problemas estruturais é importante, pois o sistema nacional de distribuição de água depende em grande parte de reservatórios de concreto e a eficiência do abastecimento depende diretamente do desempenho destas estruturas.

Para se realizar correta análise dos problemas de modo a obter as possíveis soluções é necessário fazer abordagem do contexto em que as anomalias estruturais ocorrem. Portanto, necessita-se conceituar os problemas construtivos aos quais estas estruturas estão submetidas, estudar os métodos de análise das patologias e propor estudos que possam contribuir com a melhoria dos métodos construtivos.

O principal causador de patologias e diminuição da vida útil destas edificações é a percolação de água no interior da estrutura. Portanto, necessita-se de diagnóstico dos pontos de percolação de água e da análise de como ocorre esta infiltração de água na estrutura. Durante a execução deste tipo de estrutura é comum a utilização de passantes ou tensores no travamento de fôrmas paralelas. No entanto, observa-se que no local de instalação destas peças, há ocorrência de percolação de água e pontos de vazamento, que ocasionam fragilidade estrutural. Diante do fato, necessita-se estudo do desempenho dos tensores de maneira a melhorar os métodos executivos e operacionais deste tipo de estrutura. A análise das causas e efeitos das patologias ocasionadas por penetração e água pode subsidiar a tomada de decisões na fase de projeto, execução, manutenção e operação de reservatórios de concreto.

Este trabalho se dedica à análise experimental do comportamento de tensores de barra chata com vedação utilizando-se neoprene e tensores de barra rosada com vedação utilizando-se luvas fendidas, considerando a profundidade de penetração de água na região de instalação destas peças em função das variáveis pressão e tempo de aplicação de pressão. Os experimentos foram programados estatisticamente por meio planejamento composto central e a análise foi feita pelo método de superfície de resposta. A análise dos dados mostra o desempenho dos tensores e

pode subsidiar decisões para melhoria destas peças e análise da viabilidade do seu emprego na execução de estruturas de reservatórios de distribuição de água.

## 1.1 OBJETIVOS

### *1.1.1 Objetivo Geral*

Este trabalho visa analisar o comportamento de tensores em fôrmas de concreto, a fim de contribuir para o entendimento do efeito do uso do tensor durante a fase construtiva e na vida útil dos reservatórios de concreto.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

Os objetivos específicos podem ser agrupados como segue:

- Analisar métodos e soluções construtivas de reservatórios de concreto sujeitos a patologias decorrentes do uso de tensores para fixação de fôrmas;
- Realizar ensaios experimentais para avaliar e quantificar a infiltração de água na região de posicionamento dos tensores nas fôrmas dos reservatórios de concreto;
- Analisar a influência das variáveis pressão e tempo na profundidade de penetração de água na região dos tensores;
- Entender como contribuir para melhoria dos processos de fabricação e desempenho dos tensores em relação às tecnologias e métodos construtivos utilizados na execução de reservatórios de concreto moldados *in loco*.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Existem vários problemas de patologias e vazamentos em reservatórios de distribuição em diversas concessionárias de água e esgoto do País. Os vazamentos nestas estruturas acarretam grandes gastos de dinheiro público, diminuem sua vida útil e aumentam a frequência de manutenção, acarretando problemas de fornecimento de água e diminuição da qualidade do abastecimento de água, que se constitui serviço fundamental para sociedade.

A necessidade de serviços de reparo e manutenção implica na interrupção do fornecimento de água e aumento do custo do serviço de abastecimento. Olivan et al. (2010) fizeram vistorias e levantamentos das condições de reservatórios no Estado de São Paulo, Brasil. Os reservatórios analisados são de propriedade da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, Sabesp. Ao todo foram vistoriados 197 reservatórios e levantadas as ocorrências das anomalias estruturais. Os dados coletados mostraram que a deterioração ocorreu essencialmente na parte interna dos reservatórios, nos locais onde há contato constante com água tratada. As patologias foram listadas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Patologias observadas em reservatórios do Estado de São Paulo

<b>Patologias em regiões internas e externas dos reservatórios de concreto (%)</b>		
	<b>Parte interna</b>	<b>Parte externa</b>
<b>Armadura exposta</b>	45,2	1,3
<b>Ocorrência de fissura</b>	18,1	10,4
<b>Concreto em ruína</b>	14,1	1,8
<b>Reparo incorreto</b>	3,2	1,1
<b>Carbonatação</b>	2,4	0,4
<b>Umidade</b>	0,6	1,4

Fonte: Olivan et al. (2010) adaptado.

Analisou-se também quais elementos estruturais apresentaram maior degradação em relação às patologias analisadas. Observou-se que a ocorrência de armadura exposta foi a patologia mais frequente, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Ocorrência de patologias: (a) distribuição da patologia armadura exposta em relação aos elementos estruturais (%); (b) vista interior de um reservatório



Fonte: Olivan et al. (2010) adaptado.

Olivan et al. (2010) forneceram dados que comprovaram que se houvesse o conhecimento prévio do comportamento da percolação de água na estrutura, seria mais fácil adotar medidas preventivas na fase de projeto e execução das obras.

A análise dos métodos construtivos destas estruturas moldadas *in loco* possibilita o diagnóstico das causas de problemas estruturais. Neste tipo de estrutura é comum a utilização de tensores para travamento, alinhamento e montagem de fôrmas de paredes de reservatórios (Figura 2). Estas peças permanecem dentro da estrutura durante toda sua vida útil e necessitam de estudos sobre seu desempenho.

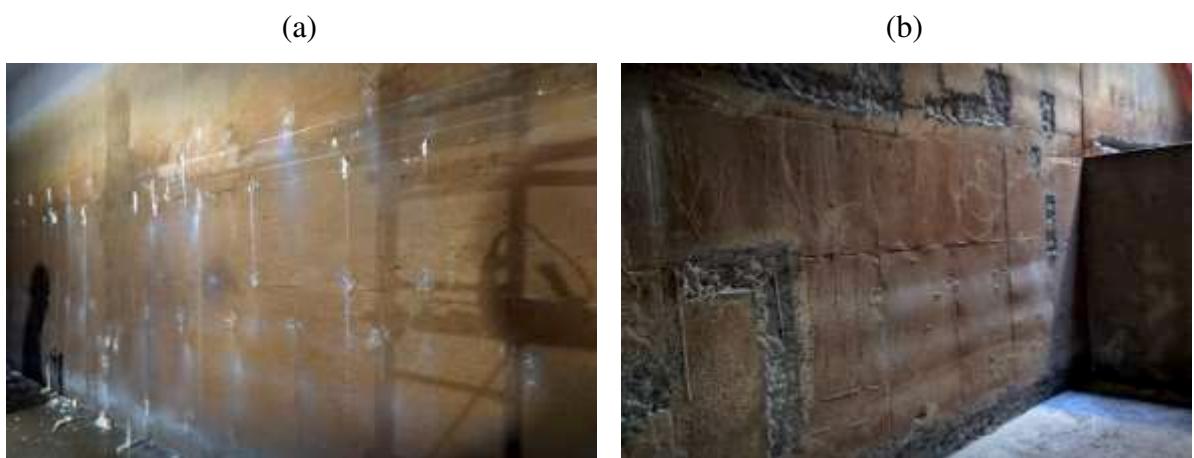
Figura 2 – Tensores utilizados para travamento de fôrmas paralelas: (a) instalação de tensores de barra roscada durante a execução de paredes de reservatório de concreto; (b) tensor de barra chata nas paredes de um reservatório apoiado após sua execução



Fonte: O autor.

Os danos estruturais em reservatórios de concreto moldados *in loco* são evidenciados em regiões de instalação de passantes ou tensores de fôrmas. A Figura 3 mostra um reservatório semienterrado, executado na cidade de Uberlândia, Minas Gerais, com volume de 10.000.000 litros que foi esvaziado para manutenção devido a problemas de estanqueidade, especialmente na região de instalação dos tensores.

Figura 3 - Patologias ocasionadas por percolação de água na estrutura: (a) infiltração de água em região de instalação de tensores; (b) demolição da parte deteriorada da estrutura

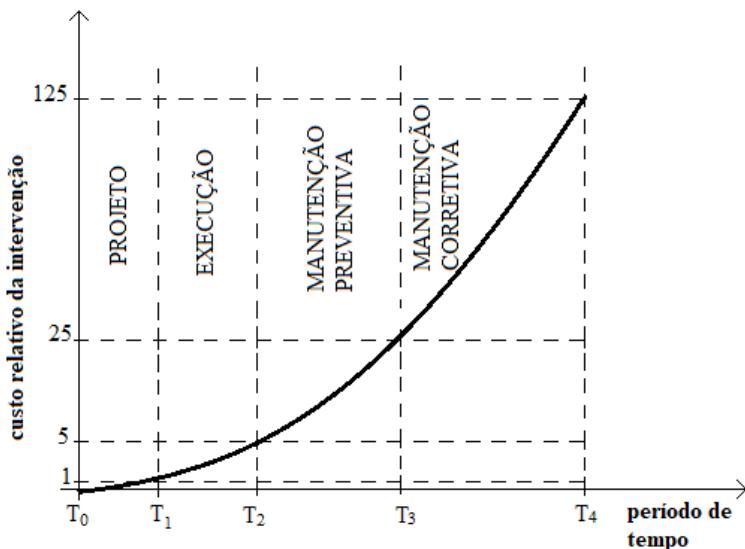


Fonte: O autor.

Além da diminuição da vida útil da estrutura, a infiltração de água no local de instalação de tensores onera o custo de operação, pois manutenções deste tipo implicam na interrupção de abastecimento e consequente diminuição de receitas, além do alto custo de reparo.

O custo de serviços corretivos em estruturas devido à percolação de água é alto e crescente em relação ao tempo. Segundo Sitter (1984) apud Medeiros et al. (2010), o custo de intervenções para soluções de problemas em estruturas de concreto armado aumenta por meio de progressão geométrica no decorrer do tempo. Portanto a demora em executar-se reparos na estrutura, especialmente manutenções corretivas, acarreta alto custo em relação às intervenções executadas no momento do projeto, conforme Figura 4.

Figura 4 - Aumento do custo da intervenção em relação ao tempo de tomada de decisão



Fonte: Sitter (1984) apud Medeiros (2010) adaptado.

O modelo mostra que uma decisão de manutenção corretiva da estrutura pode ser de 25 a 125 vezes mais onerosa que uma ação elaborada na fase de projeto, portanto necessita-se de estudos que possam fornecer informações para projetistas e executores deste tipo de estrutura.

A percolação de água dentro do concreto armado ocorre por problemas que vão desde a fase do projeto, passam pela fase de construção e se manifestam principalmente na fase de operação e manutenção da estrutura. Observa-se que o sistema normativo nacional não apresenta dados sobre utilização de tensores na execução de reservatórios, nem seu desempenho em relação à percolação de água. O sistema nacional de normas que regula projetos e métodos construtivos para este tipo de estrutura apresenta visão ampla, pois não existe norma específica de dimensionamento, execução, impermeabilização, operação e manutenção específica para reservatórios de concreto para abastecimento de água. Portanto, necessita-se de aprofundamento de estudos que possam preencher estas lacunas de conhecimento.

Esta pesquisa visa estudar estes problemas de percolação de água nas paredes de reservatórios de concreto, na região de instalação de tensores de fôrmas, de maneira a criar modelos experimentais que possibilitem a tomada de decisão para otimização de projetos e melhoria em processos de manutenção e operação deste tipo de estrutura.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para a apresentação dos temas propostos e com o intuito de organizar o conteúdo, a pesquisa está dividida segundo os capítulos que seguem:

- Capítulo 1- Apresenta introdução e contextualização do trabalho, mostra a contribuição do trabalho proposto e sua relevância.
- Capítulo 2- Analisa-se estudos nacionais e internacionais a respeito do tema, observa-se publicações e informações relevantes para análise do objeto proposto, sob diversas perspectivas ao se considerar várias áreas do conhecimento, com o objetivo de se observar soluções que possam melhorar o desempenho das estruturas.
- Capítulo 3- Propõe os métodos, materiais e a fundamentação da análise estatística para geração e validação de modelos experimentais, que possibilitam a obtenção dos resultados da pesquisa.
- Capítulo 4- Mostra-se a análise e discussão dos dados obtidos, e a sua correlação com o referencial teórico da pesquisa.
- Capítulo 5- Analisa-se as contribuições do trabalho, os resultados finais e a aplicação prática dos resultados obtidos, juntamente com sugestão para futuros estudos.

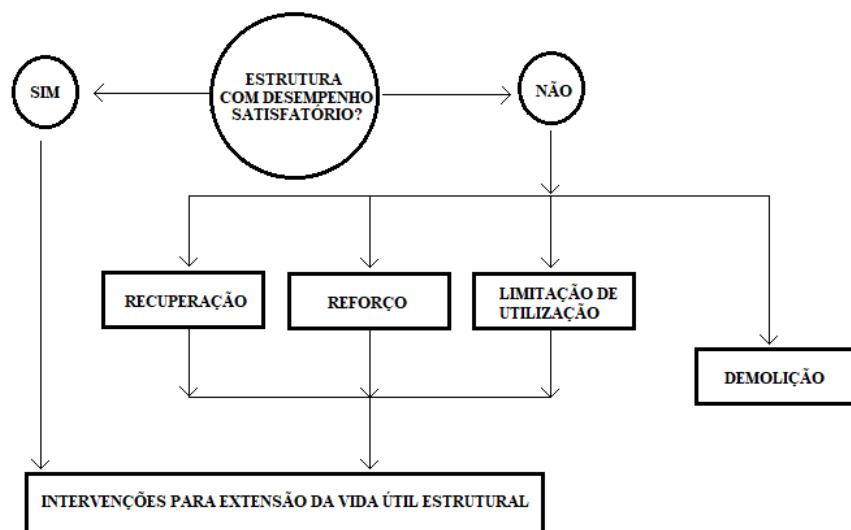
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo teve como objetivo de mostrar os conceitos de patologias, suas principais causas e ocorrências em estruturas de concreto em contato constante com a água. Foram apresentados vários tipos de patologias em estruturas e métodos terapêuticos adotados, onde examinou-se modelos de estudo, normas internacionais e nacionais a respeito do assunto. Houve a análise de estudos de ciência de materiais e métodos construtivos e que possam ser utilizados na melhoria de desempenho das estruturas e atenuar os efeitos de percolação de água em seu interior.

### 2.1 ANÁLISE DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA MOLDADOS *IN LOCO*

O conceito de patologia em estruturas, de acordo com Souza e Ripper (1998) apud Lima (2011), refere-se a um campo muito importante de estudos da engenharia, que investiga as origens relacionadas, as manifestações, consequências e mecanismos de ocorrência de falha, quebra e deficiência de desempenho em sistemas estruturais. Esta ciência estuda as causas das falhas nas edificações e/ou anomalias que influenciam diretamente na durabilidade, função e resistência das estruturas, bem como analisa medidas terapêuticas aplicadas na solução dos problemas. Os autores mostram, de forma esquemática, a maneira de efetuar reparos em estruturas de concreto, de acordo com a Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma de ações e reparos de patologias em estruturas



Fonte: Souza e Ripper (1998) apud Lima (2011) adaptado.

Andrade e Silva (2005) e Azevedo (2011) destacam que o estudo de patologias em estruturas é de elevada importância pois não se limita em avaliar danos, estudar causas e propor melhor método de correção. Os estudos contínuos de ocorrências patológicas em estruturas podem melhorar critérios de elaboração de projetos e execução de obra, além de minimizar riscos estruturais e aumentar sua vida útil.

## 2.2 PANORAMA DE PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS NO BRASIL

O mapeamento das causas das patologias possibilita a elaboração de soluções. Observa-se, conforme Tabela 3, que o surgimento de patologias em concreto armado está diretamente ligado à qualidade do projeto e a eficiência dos métodos de execução da obra, portanto tais parâmetros se mostram significativos para análise das patologias em estruturas.

Tabela 3 - Principais causas de patologias em estruturas no Brasil no ano de 2003

CAUSAS DE PATOLOGIAS	PERCENTUAL (%)
Causas diversas	1,6
Disposições defeituosas	2,5
Erros de concepção	3,5
Fenômenos químicos	4,0
Erros nas hipóteses de cálculo e uso dos materiais	8,5
Falhas de procedimento execução	16,5
Deformações excessivas e sobrecargas	19,7
Falhas resultantes de variações dimensionais de peças na execução	43,7

Fonte: Do Carmo (2003) adaptado.

Piancastelli et al. (2017) também fizeram levantamento de ocorrências de patologias, onde fica demonstrado que as patologias que ocorrem no país são ocasionadas principalmente por problemas relacionados à elaboração de projetos e de falhas na execução, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Principais causas de patologias em estruturas de concreto no Brasil em 2017

CAUSAS DE OCORRÊNCIA DE PATOLOGIAS NO BRASIL	PERCENTUAL (%)
Falhas na execução	51
Problemas na elaboração do projeto	18
Utilização inadequada da estrutura	13
Emprego de materiais impróprios ou falha em materiais	7
Causas fortuitas	6
Falhas no processo de manutenção	3
Outros	2

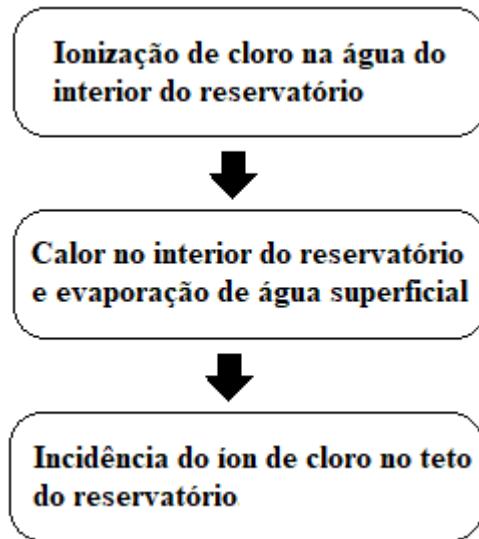
Fonte: Piancastelli et al. (2017) adaptado.

Ao observar o panorama das ocorrências de patologias, pode-se afirmar que as causas mais significativas para o surgimento das anomalias são problemas de projetos e de execução de obras, então medidas terapêuticas adotadas levando-se em consideração essas variáveis são muito relevantes para solução de problemas estruturais.

### 2.3 ANÁLISE DE PATOLOGIAS E TERAPIAS CONSTRUTIVAS EM RESERVATÓRIOS DE CONCRETO MOLDADOS *IN LOCO*

Tavassoli e Afshar (2017) estudaram os efeitos dos íons de cloro na deterioração de tetos de reservatórios de concreto na cidade de Bandar Abbas, no Irã, e mostraram que a agressão ao teto da estrutura é potencializada pelo calor e por criação de vapor de água no seu interior, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Penetração de íons de cloro no teto do reservatório

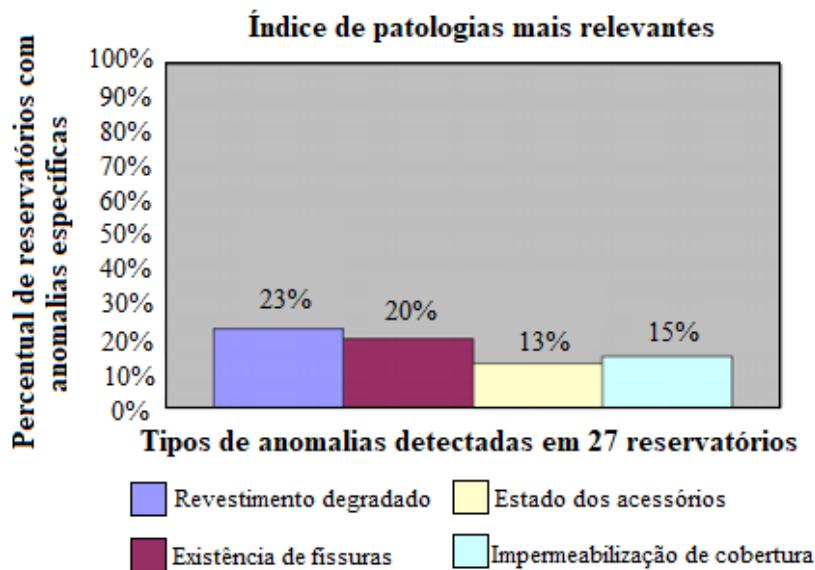


Fonte: Tavassoli e Afshar (2017) adaptado

Observou-se que além do concreto apresentar alta porosidade, falhas na dosagem, defeitos de impermeabilização em juntas e elementos estruturais, o cobrimento de armadura executado foi insuficiente. Foi feito o estudo de aplicação de produto cristalizante na superfície interna do teto do reservatório para impedir a entrada de vapor de água no interior da estrutura, os testes laboratoriais mostraram que a solução é eficiente para diminuir o problema de corrosão das armaduras. No entanto, ficou demonstrado que altos índices de íons de cloro que são lançados na estrutura no processo de vaporização da água são os causadores das patologias. As condições adversas aliadas à um sistema deficiente de exaustão e ventilação do vapor do interior da estrutura, contribuíram para a incidência das patologias observadas.

Pereira (2010) fez a análise de 27 reservatórios de concreto em Portugal e observou que os principais motivos de incidência das patologias foram: degradação de revestimento, que acarretou corrosão de armadura, ocorrência de fissuras, ausência de impermeabilização na cobertura dos reservatórios e degradação de componentes e acessórios da estrutura, tais como tampas de proteção, escadas e tubulações metálicas no interior da estrutura, conforme Figura 7.

Figura 7 - Principais patologias analisadas



Fonte: Pereira (2010) adaptado.

O autor identifica como principais fatores para o surgimento das patologias: concepção errônea do projeto, fiscalização ineficiente que permitiu a execução de serviços em desconformidade com o projeto, desconhecimento das características do solo em virtude de estudo geológico ineficaz, mau uso dos reservatórios, deficiência na execução de juntas de concretagem nos sentidos verticais e horizontais e percolação de água através dos elementos estruturais.

De acordo com Pereira (2010) as soluções adequadas para o tratamento das patologias são:

- Impermeabilização da parte superior do reservatório: consiste na aplicação de produtos betuminosos e readequar os níveis da tampa do reservatório de maneira a possibilitar implantação de camada de argamassa com inclinação máxima de 1,5%, que permita o escoamento de águas pluviais;
- Adequação do sistema de ventilação da parte superior do reservatório: obras no sistema superior de ventilação do reservatório, reparo nos acessórios e aumento da capacidade de exaustão do sistema;
- Execução de impermeabilização: feita com manta asfáltica e proteção mecânica da estrutura;
- Impermeabilização no interior do reservatório: executada com argamassas impermeabilizantes, produtos cristalizantes e tinta epóxi;
- Tratamento e preenchimento de fissuras: executado com injeção adesiva e membrana que pode ficar em contato com a água potável;

- Recomposição de armaduras e restauração de espessura de revestimentos: aplicação de graute e produtos de fixação da armadura no concreto.

Foi concluído pelo autor que as estruturas podem ser restauradas, porém, devido ao tempo de ocorrência das patologias, tais ações ficaram mais onerosas para as empresas concessionárias do sistema de abastecimento de água. Contudo, as soluções apresentadas se mostraram eficientes para garantir o correto desempenho da estrutura.

Sollero e Bolerino (2016) propuseram métodos de análise de um reservatório de concreto armado, com formato cilíndrico. O estudo pautou-se em inspeções visuais, entrevistas com os proprietários, análise de projetos e planilhas de cálculo da estrutura e investigação a respeito dos métodos construtivos empregados. De acordo com os autores, não foram encontrados registros de controle tecnológico de concreto ou detalhes executivos de projetos de impermeabilização. Observou-se que após o início da operação, o reservatório apresentou vazamentos e problemas de estanqueidade. Como agravante, foi executado um serviço de reparo com manta asfáltica e um revestimento externo com epóxi e poliuretano, que foi ineficiente para garantir a impermeabilização da estrutura. Mesmo após as intervenções, os autores notaram a existência de várias patologias, tais como desmoronamento de concreto, soltura de partes da estrutura, rachaduras e lixiviações nas paredes do reservatório, de acordo com a Figura 8.

Figura 8 - Patologias encontradas pelos autores: (a) rachaduras e solturas de partes; (b) lixiviações nas paredes do reservatório



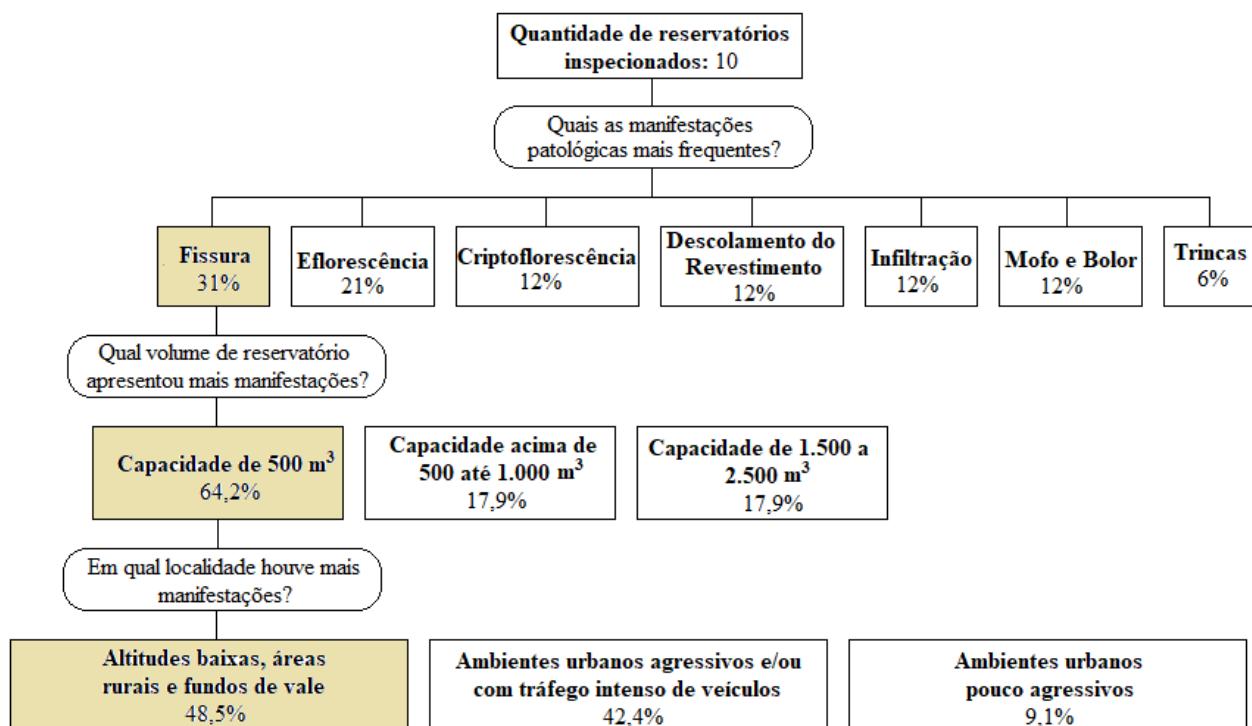
Fonte: Sollero e Bolerino (2016).

O estudo dos autores revelou que erros no processo construtivo, percolação de água no interior da estrutura, cura insuficiente do reservatório, juntamente com a elaboração inadequada do projeto, ocasionaram fissuras e diminuição da vida útil da estrutura. Os autores propuseram as intervenções para melhoria das condições estruturais:

- Reparação de trincas e rachaduras por cristalização, vedação e injeção de produtos à base de poliuretano;
- Execução de sistema aberto à difusão de vapor de água, com o objetivo de reduzir a umidade no teto do reservatório e retardar reações expansivas;
- Inspeções periódicas sobre o avanço das patologias.

Rachid e Londero (2013) realizaram a análise de nove reservatórios apoiados e um semienterrado na cidade de Cascavel-PR, sob propriedade da Companhia de Saneamento do Paraná, Sanepar. Ao analisar documentos, projetos e históricos de obras, as autoras conseguiram traçar um histórico construtivo e de intervenções na estrutura. Foi elaborado um fluxograma de patologias do sistema de abastecimento, demonstrando que a ocorrência das anomalias estruturais foi mais frequente em regiões de baixas altitudes, que estão mais expostas às ações de umidade, conforme Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma de patologias em reservatórios de Cascavel-PR



Fonte: Rachid e Londero (2013) adaptado.

As autoras observaram que a hipótese de Pereira (2010) foi confirmada e que os reservatórios apresentaram mais patologias em regiões de baixas altitudes devido à agressividade do ambiente. Os principais fatores detectados foram projetos inadequados, utilização de materiais inapropriados e falhas na execução.

Zarzar Júnior et al. 2011 realizaram diagnóstico sobre manifestações patológicas e análise da vida útil de reservatórios de distribuição de água da Companhia Pernambucana de Saneamento, Compesa, na cidade de Recife. Foram analisados três reservatórios na cidade. Utilizou-se como método de levantamento inspeção visual, coleta de informações sobre idade e condições das estruturas, utilização de ensaios destrutivos e não destrutivos. Observou-se que todos os reservatórios necessitavam de plano de manutenção regular e de execução de revestimento mais resistente aos íons de cloro. As regiões que estavam submetidas a ações diretas do vapor de água apresentavam necessidade de intervenção no revestimento e em alguns locais já havia perda de seção da estrutura, conforme Figura 10.

Figura 10 – Patologias encontradas pelos autores: (a) patologias no revestimento; (b) armadura exposta no teto do reservatório por ação de íons de cloro



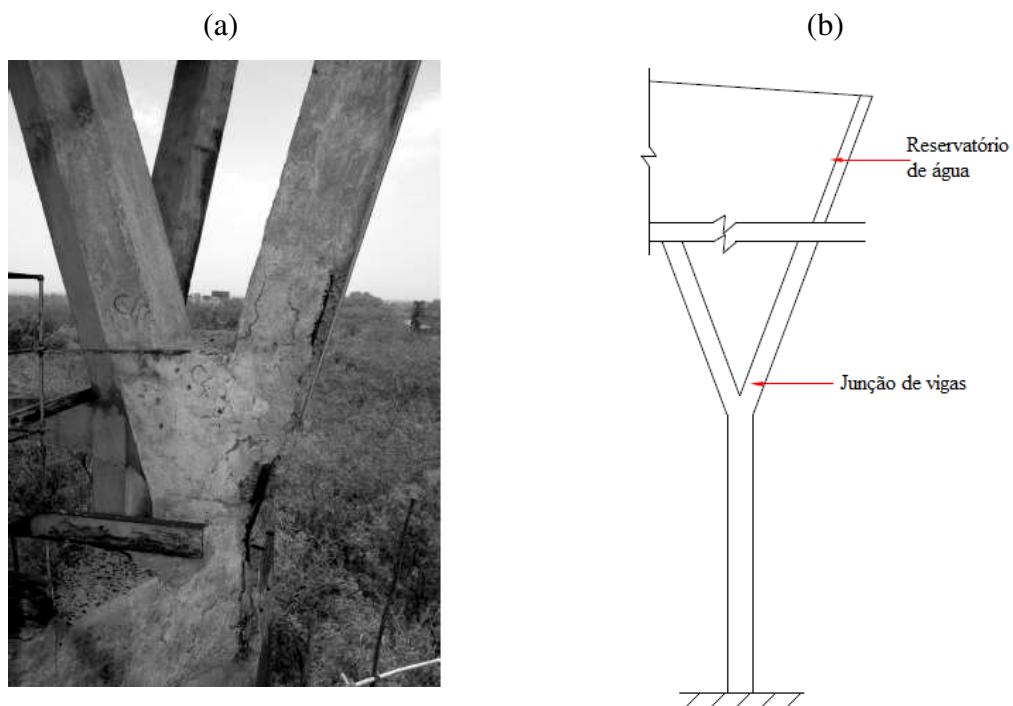
Fonte: Zarzar Júnior et al. (2011).

Os autores afirmam que a vida útil prevista da maioria das estruturas é menor que a vida útil de serviço, demonstrando que não há um desempenho estrutural adequado. Foi concluído que se necessita de uma amostra maior que três estruturas para uma análise mais adequada e também que se deve considerar mais variáveis que possam contribuir para incidência destas patologias. Segundo os autores, é necessário refazer o revestimento com produtos impermeáveis e o

monitoramento constante da estrutura e obras que restaurem a perda de seção da estrutura. No caso de perda de seção, recomenda-se execução de limpeza da superfície de concreto com jato de alta pressão e posterior aplicação de graute. Se a armadura não perder sua resistência estrutural, pode-se executar limpeza com escova de aço e posterior aplicação de produto inibidor de corrosão.

Bhaskar et al. (2006) fizeram a análise de um reservatório de concreto elevado de distribuição de água em Hyderabad, na Índia, e após análise dos projetos e documentos da estrutura constataram que o reservatório de 30 anos de idade apresentava diversos problemas estruturais, especialmente nas junções de peças e juntas de concretagem. A Figura 11 mostra dados da geometria da estrutura e alguns problemas estruturais.

Figura 11 - Patologias em reservatório elevado: (a) problemas no revestimento e juntas de concretagem; (b) estrutura de sustentação do reservatório



Fonte: Bhaskar et al. (2006) adaptado.

Os autores afirmam que as juntas de concretagem devem ser reparadas utilizando-se as medidas:

- Demolição do concreto arruinado até a exposição total da armadura;

- Limpeza da superfície demolida com aplicação de jato de areia ou jato de água pressurizada;
- Aplicação de produtos anticorrosivos na superfície da armadura;
- Injeção de produtos que melhorem a aderência entre o concreto antigo e o novo, podendo-se utilizar conectores de cisalhamento para melhorar esta aderência;
- Na parte interna do reservatório foi recomendado impermeabilização com produtos resistentes à entrada de cloretos na estrutura nas juntas e tensores de fôrmas.

Torres et al. (2014) fizeram levantamento de patologias em quatro reservatórios elevados na cidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul, que pertencem à concessionária SANEP (Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas), todos construídos na década de 1980. Ao se realizar a inspeção e o estudo de cada ocorrência, os autores elaboraram análise das ocorrências de patologias e suas causas, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Patologias observadas em reservatórios da cidade de Pelotas

<b>Manifestação patológica</b>	<b>Causas prováveis</b>
<b>Manchas e sujidades</b>	Ausência de pingadeiras em vigas, parte superiores das vigas sem inclinação e ausência de plano de manutenção
<b>Armaduras expostas, com sinais de corrosão</b>	Cobrimento insuficiente
<b>Fissuras, lascamentos, desagregações e armaduras expostas com corrosão</b>	Falha no projeto: cobrimento de armadura não obedece à norma; Falha de execução: não foram utilizados espaçadores na obra
<b>Desgaste, eflorescência e bolor</b>	Utilização inadequada e falta de conservação
<b>Degradação e aumento da tensão nos materiais</b>	Queimadas próximas à estrutura e vandalismo

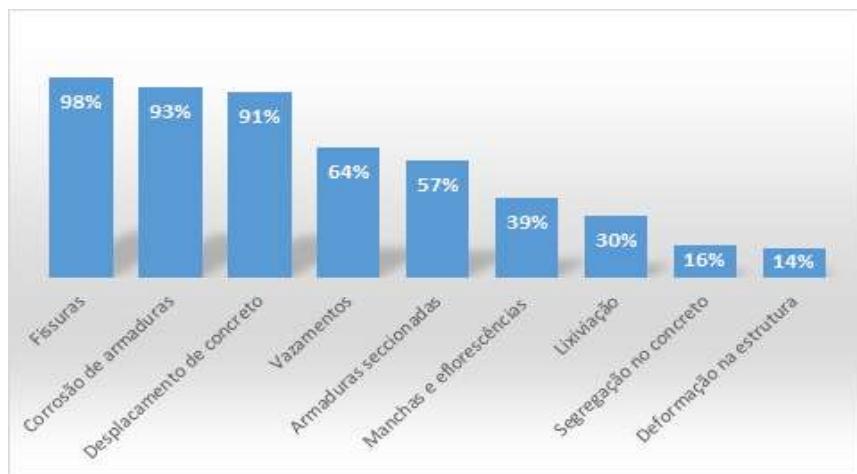
Fonte: Torres et al. (2014) adaptado.

Foi concluído que os defeitos de projeto, problemas de execução, falta de um plano de manutenção e ausência de manutenções preventivas, foram as causas do surgimento e agravamento das patologias. Foi sugerida intervenção imediata nos reservatórios, com utilização das terapias recomendadas, para que não haja risco de ruína estrutural.

Foi realizada por Tinoco e Moraes (2011) análise das condições técnicas e operacionais de 45 reservatórios no Estado do Rio Grande do Norte, pertencentes à Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Ao todo inspecionou-se 39 reservatórios elevados, 5

reservatórios apoiados e 1 reservatório do tipo semienterrado. Foi realizado levantamento de dados utilizando-se projetos e documentos. Posteriormente foram realizados ensaios não destrutivos e ensaios em elementos das estruturas. Constatou-se que maior parte dos reservatórios tinham idades superiores a 20 anos apresentavam diversas patologias, conforme Figura 12.

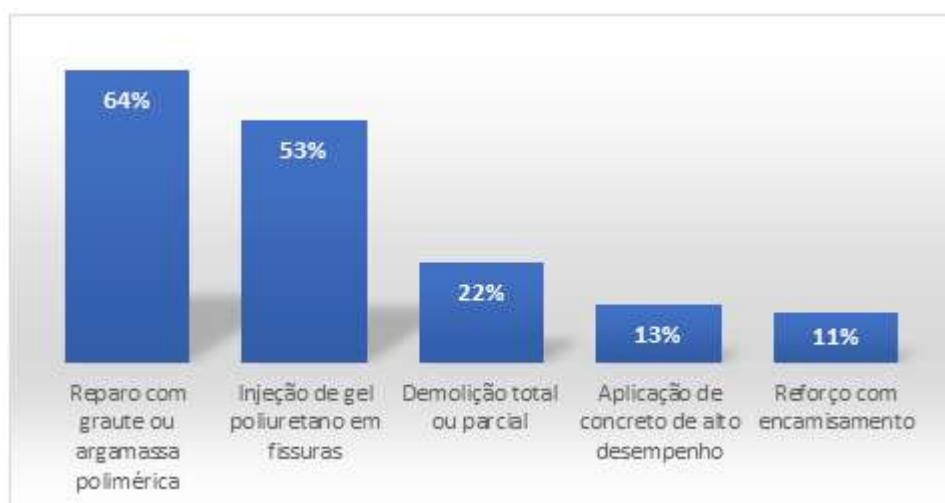
Figura 12 - Ocorrência de patologias em reservatórios no Rio Grande do Norte



Fonte: Tinoco e Moraes (2011) adaptado.

Os autores apresentaram planos de intervenções e soluções de reparo nas estruturas (Figura 13). Apesar de constatação de problemas em projetos, foi identificado pelos autores como a principal fonte de patologia, a execução inadequada das obras aliada à ausência de manutenções periódicas e inexistência de plano de manutenção.

Figura 13 - Soluções construtivas propostas por Tonico e Moraes (2011)



Fonte: Tinoco e Moraes (2011) adaptado.

Observa-se que tais falhas de execução e manutenção, especialmente na região de percolação de água, afetaram a vida útil de várias estruturas a ponto de não ser possível realizar obras de reparação.

Corrêa e Girardi (2018) analisaram 19 reservatórios na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, pertencentes ao Departamento Municipal de Água e Esgoto, DMAE do município. O estudo foi feito com reservatórios construídos desde 1960 até 2005, com condições operacionais, ambientes de agressividade, volumes de reservatórios e normatizações construtivas diferentes. Os autores discutem que no Brasil não há norma específica para construção de reservatórios de concreto, portanto projetistas devem se embasar em diversas normas vigentes para a elaboração deste tipo de projeto. Foi levantada a dificuldade de elaborar projetos de reservatórios de água potável, pois não há uma norma que correlacione o dimensionamento de reservatórios de distribuição com os parâmetros físico-químicos da água. A ausência desta regulação possibilita a adoção de medidas que possam interferir negativamente no desempenho das estruturas.

Após a revisão de normas vigentes à época da execução das estruturas, Corrêa e Girardi (2018) constataram problemas de projeto, pois os reservatórios não atenderam às espessuras de cobrimento especificadas nas normas. Os autores também observaram problemas de execução, pois o cobrimento foi executado em espessura inferior ao estabelecido em projeto. Os problemas para o sistema público foram aumento nos custos de impermeabilização, crescimento nos custos de manutenção e desabastecimento de água em virtude das intervenções. Como método terapêutico foi recomendada a restauração do cobrimento das estruturas com graute e argamassas poliméricas e execução de pinturas anticorrosivas nas armaduras expostas.

Santiago e Silva (2015), analisaram as condições de um reservatório de capacidade de armazenamento de um milhão de metros cúbicos de água, no Estado de São Paulo. Os autores utilizaram marreta leve para fazer percussão na estrutura, aplicaram o método bate choco para descobrir pontos de falhas. Este método consiste na aplicação de golpes fracos de marreta na estrutura e análise do som que é emitido. Os autores também utilizaram um pacômetro para investigar o diâmetro e a posição de armaduras. Segundo Cacciari (2018) o método de bate choco é eficiente para caracterizar peças soltas, pontos de desagregação e pontos fracos em paredes de estruturas ou estruturas de contenção. Pode-se aplicar o método para diagnóstico de

problemas patológicos em estruturas de concreto em geral. Tal método pode ser utilizado de maneira rápida e simples para diagnóstico de problemas estruturais.

Foram detectados diversos problemas executivos: vazamentos, falhas de concretagem e segregação de concreto, míslas com dimensões do previsto em projeto, juntas de concretagem com tratamento inadequado, cobrimento insuficiente, fissuração de peças, manchas com eflorescência e infiltração de água no local de instalação de tensores de fôrmas. A Figura 14 ilustra execução de mísla entre piso e parede do reservatório executada de forma divergente do projeto, com segregação de concreto e cobrimento incorreto que acarretou exposição de armadura. Também é mostrada de junta de concretagem executada incorretamente e pontos de vazamentos devido à execução incorreta dos fixadores de fôrmas.

Figura 14 - Patologias em reservatório apoiado: (a) execução inadequada de mísla na junção fundo-parede; (b) junta de concretagem inadequada e vazamento de água através de fixadores



Fonte: Santiago e Silva (2015).

Os métodos de correção foram a remoção de concreto deteriorado, aplicação de jateamento de ar comprimido filtrado para limpeza da superfície do concreto e das armaduras, escovação das armaduras com cerdas de aço, aplicação de inibidor de corrosão em armaduras previamente limpas. Reparos superficiais com até 4 cm de profundidade, foram executados com argamassa polimérica aplicada sobre ponte de aderência com argamassa aditivada. A argamassa foi homogeneizada utilizando-se hélice helicoidal acoplada à furadeira com baixa rotação e aplicada com camadas de no máximo 2 cm, com cura úmida de 3 dias. Os reparos profundos, acima de 4 cm da superfície, foram executados com graute lançado na estrutura por intermédio de fôrmas tipo com漏斗 ou tipo cachimbo, com cura úmida de 7 dias. As fissuras foram tratadas com a injeção de epóxi. As fissuras com aberturas inferiores à 2 mm foram reparadas por meio

de abertura, limpeza e aplicação de pasta de epóxi. Fissuras com aberturas superiores a 2 mm foram reparadas com injeção de epóxi dosado com resina e endurecedor, aplicado por intermédio de bicos de aderência. Em pontos de vazamentos executou-se aplicação de poliuretano hidro expansivo na parte externa da estrutura.

Segundo Santiago e Silva (2015) foi realizado o enchimento incremental do reservatório, com verificação de flechas, recalques e deformações, observou-se que estes limites pré-estabelecidos nos projetos foram respeitados. No entanto, a impermeabilização com argamassa polimérica não foi eficiente, pois foram executadas grandes dimensões com esta técnica, o que ocasionou fissuras no material. Devido às dimensões do reservatório, o sistema de impermeabilização com argamassa foi substituído por manta de PVC não aderente. Após a execução dos serviços a estrutura ficou apta à operação e funcionamento.

## 2.4 NORMAS NACIONAIS, INTERNACIONAIS E MÉTODOS DE ANÁLISE DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS

Reservatórios de concreto de distribuição de água são estruturas com grande volume de concreto armado, que demandam métodos de execução complexos e em muitos casos necessita-se de execução de juntas de concretagem no seu processo construtivo. De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, os projetos de execução de juntas de concretagem devem indicar os locais das juntas e sua configuração de superfície, com previsão de armadura de costura, com ancoragem adequada.

Outro aspecto importante da ABNT NBR 6118:2014 é que a região interna de reservatórios de concreto se enquadra na classe de agressividade ambiental IV, ou seja, o concreto deve possuir cobrimento nominal de no mínimo  $50\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$ . A norma também define a necessidade de avaliação da conformidade do projeto estrutural, por um profissional independente do projetista, antes da fase de execução da obra. Após findada a etapa de projeto estrutural e executivo, deve ser elaborado plano de utilização, inspeção e manutenção da estrutura.

Pode-se verificar na ABNT NBR 14931:2014, Execução de estruturas de concreto – Procedimento, que em relação às juntas de concretagem, há a recomendação de aplicação de jato de água com forte pressão para a deixar a superfície previamente concretada com agregados

graúdos expostos, de maneira a reduzir perdas de materiais. A norma possibilita utilização de produtos que possam melhorar a aderência entre o concreto mais velho e o novo concreto a ser lançado.

A junção entre o concreto antigo e o recente deve ser estanque, portanto observa-se na ABNT NBR 9575:2010, Impermeabilização – seleção e projeto, que se aplica na elaboração de projetos de reservatórios de água potável, a existência de um sistema de classificação, definição e utilização dos tipos de impermeabilização. Classifica-se os produtos em cimentícios, asfálticos e poliméricos, no entanto todo o trabalho de preparo de substrato e aplicação dos produtos e materiais deve ser executado em conformidade com a ABNT NBR 9574:2008, Execução de impermeabilização. Após a execução do sistema de impermeabilização, executa-se ensaios e testes em conformidade com a ABNT NBR 12170:2017, Materiais de impermeabilização – Determinação da potabilidade da água após o contato, para se garantir a aceitação do sistema e verificar a qualidade do serviço de impermeabilização, funcionamento do reservatório e a potabilidade da água.

Observa-se que no sistema de normas nacionais também há cuidado com a ventilação dos reservatórios, a ABNT NBR 12217:1994, Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento, preconiza que reservatórios de concreto de distribuição de água devem ter ventilação através de dutos que impeçam entrada de águas pluviais e contaminantes e que limitem a entrada de poeira. O sistema de exaustão deve ser projetado com a vazão de ar igual à máxima vazão de escoamento de água do reservatório.

Verifica-se que no sistema nacional de normas que tratam de procedimentos para elaboração de projeto e execução de estruturas de concreto, não há norma específica de execução de reservatórios de concreto que integre projeto de impermeabilização, projeto de estruturas, projeto executivo, projeto de exaustão de vapor de água clorada e plano de operação e manutenção deste tipo de construção. O atual sistema normativo apresenta uma visão geral sobre vários parâmetros deste tipo de estrutura, portanto há possibilidade de especificação deficiente de juntas de concretagem, elaboração incorreta de projeto de sistema de ventilação, especificação incorreta do sistema de impermeabilização e consequente execução incorreta de elementos estruturais. Em ambas situações podem surgir problemas estruturais, funcionamento deficiente, perda de desempenho e diminuição da vida útil deste tipo de estrutura.

Ao se analisar a fase de funcionamento das estruturas e edificações, observa-se que a ABNT NBR 15575-1:2013, Edificações habitacionais – Desempenho, parte 1: Requisitos gerais, define que o tempo de vida útil para estruturas em geral deve ser superior no mínimo a 50 anos, com valor intermediário de 63 anos e valor máximo de 75 anos. Um fator preponderante para que a estrutura atinja o tempo de vida útil é a elaboração do sistema de gestão da manutenção da estrutura. Na ABNT NBR 5674:2012, Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção, observa-se que o plano de manutenção é indispensável e deve zelar pela preservação das características originais da estrutura e suas condições de uso, deve-se também prevenir perda de desempenho em função de degradação dos componentes da estrutura. No documento devem constar as características técnicas, manual operacional e lista de procedimentos necessários para garantir conservação, manutenção e operação dos equipamentos.

Helene e Andrade (2010) afirmam que grandes centros de pesquisa nos Estados Unidos e Europa vêm desenvolvendo várias tecnologias que contribuem para o desempenho e o aumento da vida útil das estruturas de concreto.

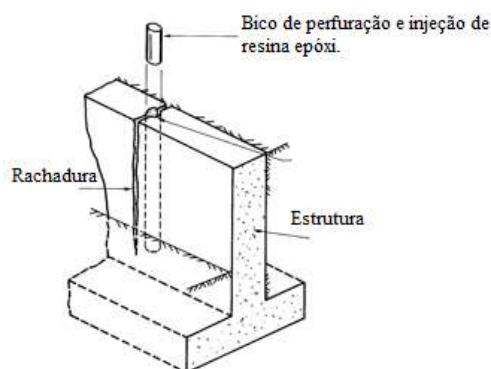
Ao se comparar parâmetros da norma ABNT NBR 6118:2014, com as normas dos Estados Unidos da América, observa-se critérios mais conservadores das normas estadunidenses em métodos para projetos e execução de reservatórios de concreto. A ABNT NBR 6118:2014 fixa limite máximo de abertura de fissuras de 0,2 mm para concretos com resistência característica à compressão menor ou igual à 40 MPa, porém a norma do American Concrete Institute, ACI 224R-01: 2001, Controle de fissuração em estruturas de concreto, limita as aberturas de fissuras para este tipo de estrutura de 0,1 mm. Contudo, a norma ACI 201.2R-08:2008, Guia para concreto durável, recomenda a adoção de valores menores de abertura de fissuras, devido à agressividade do ambiente a qual reservatórios estão submetidos.

As normas do American Concrete Institute (ACI) apresentam vários detalhes em relação às técnicas construtivas, portanto é possível observar maior detalhamento de reparação em estruturas. Ao se comparar com a norma ABNT NBR 14931:2014, as normas da ACI que tratam de métodos executivos e de técnicas construtivas de reparo em estruturas, apresentam mais métodos e esquemas gráficos específicos para este tipo de serviço.

A norma ACI 224.1R-07:2007, Causas, avaliação e reparo de trincas na estrutura de concreto, discorre sobre procedimentos de tratamento de patologias em estruturas, que podem ser utilizados na reparação de reservatórios de concreto:

- Injeção de epóxi: consiste na aplicação de epóxi sobre pressão em rachaduras e pontos de ruínas ou vazamentos. O procedimento pode ser realizado por meio de perfuração do local da rachadura, inserção de barra metálica com o bico injetor do material e posterior injeção de epóxi (Figura 15).

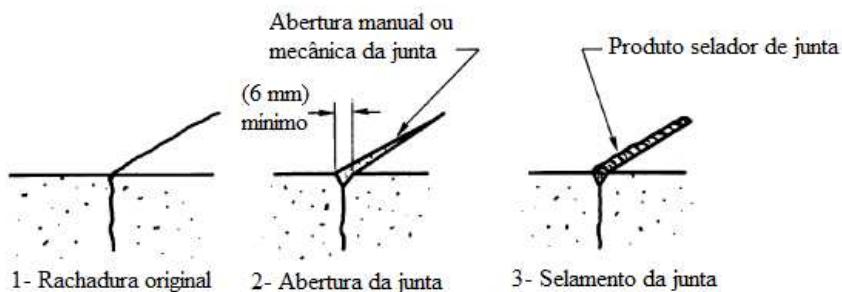
Figura 15 - Reparo de estrutura de concreto armado com a utilização de resina époxi



Fonte: ACI 224.1R-07 (2007) adaptado.

- Abertura e vedação da junta: consiste em identificar a posição da rachadura, executar manual ou mecanicamente a abertura de um sulco na mesma direção da junta e preencher a abertura com produtos selantes que podem ser compostos por epóxis, silicones, polissulfetos, materiais betuminosos e argamassas poliméricas. O método de reparo deve ser seguido em conformidade com a Figura 16.

Figura 16 - Reparo de rachadura utilizando método de abertura e vedação de junta

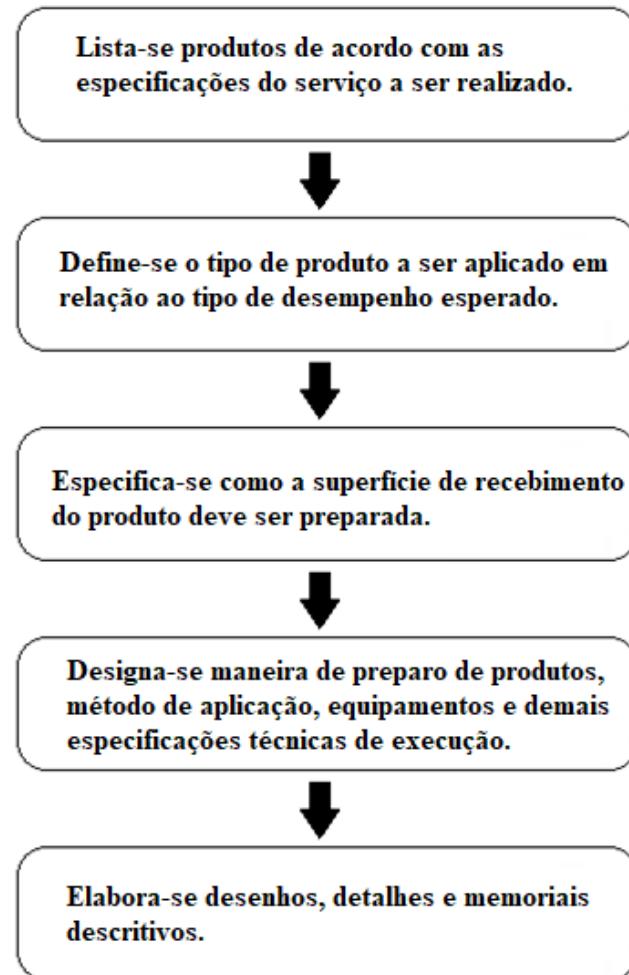


Fonte: ACI 224.1R-07 (2007) adaptado.

Ao seguir a mesma diretriz de integração de aspectos estruturais e de desempenho das normas dos Estados Unidos da América, o sistema Europeu utiliza um conjunto de normas para definir as diretrizes para estruturas de concreto. O conjunto de normas da série European Standard 1504: Produtos e sistemas para proteção e reparo de estrutura de concreto – Definições, requisitos, controle de qualidade e avaliação da conformidade, integra os serviços de reparo, proteção, manutenção, impermeabilização e reforço de estruturas de concreto expostas à umidade.

A norma EN 1504-2:2004, Sistemas de proteção de superfície para concreto, define a classificação de produtos e ensaios, que devem ser feitos antes da impermeabilização em estruturas de concreto armado. Esta norma, define quais controles de qualidade devem ser feitos para os produtos e informa quais os métodos corretos de aplicação na superfície do concreto. Utilizando-se métodos similares, a EN 1504-7:2006, Reforços e proteção contra corrosão, também mostra quais métodos construtivos que devem ser aplicados nas estruturas de concreto para combater o processo de corrosão. Ambas as normas abordam a execução do serviço de reparo na estrutura em conformidade com a Figura 17.

Figura 17 - Método de execução de reparos de corrosão e impermeabilização superficial



Fonte: EN 1504-2 (2004) e 1504-7 (2006) adaptado.

A norma EN 1504-9:2008, Princípios gerais para uso de produtos e sistemas, apresenta diversas causas de problemas estruturais e métodos de reparos em estruturas, separando-se as patologias em relação à degradação do concreto e em relação à degradação da armadura. A EN 1504-9:2008 discorre sobre fatores de degradação de elementos estruturais e mostra os métodos construtivos para reparação de patologias, ao se tratar de forma integrada as causas das patologias, produtos e tecnologias para correção e impermeabilização da estrutura, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Problemas de degradação no concreto e métodos construtivos de correção

<b>Fatores de degradação do concreto</b>	<b>Métodos construtivos de correção</b>
<b>Proteção contra agentes externos:</b> consiste na redução ou eliminação de absorção de elementos agressivos contra o concreto, tais como: água e demais líquidos, vapores, gases químicos e agentes biológicos	Preenchimento de fissuras, pinturas impermeabilizantes, aplicação de membranas impermeáveis, montagem de painéis externos de proteção
<b>Controle de umidade:</b> manutenção da umidade dentro da estrutura de concreto em conformidade com a especificação de projeto	Pinturas hidrofóbicas, revestimento superficial impermeável e proteção do revestimento
<b>Reparo no concreto:</b> restitui-se o concreto com o objetivo de preservar sua forma e suas características construtivas originais	Aplicação de argamassa e concreto com desempenhos especiais e substituição de peças danificadas por outros materiais
<b>Reforço estrutural:</b> aumento ou restituição da resistência da estrutura de concreto	Aumento da área de aço na seção, instalação de barras de reforço inseridas em orifícios do concreto, instalação de perfis na estrutura, enchimento de fissuras, vazios e fendas
<b>Resistência física da estrutura:</b> consiste no aumento da resistência do concreto a ataques físicos e mecânicos	Aumento do cobrimento e da espessura dos revestimentos, pinturas resistentes na parte externa da estrutura
<b>Resistência química da estrutura:</b> consiste no aumento da resistência do concreto à deterioração por ataques químicos	Aumento do cobrimento e escolha de revestimentos e pinturas resistentes ao tipo de ataque químico que a estrutura está exposta

Fonte: EN 1504-9 (2008) adaptado.

Na norma EN 1504-9:2008 também é possível observar os métodos construtivos para reparação de patologias que ocasionam degradação na armadura. A Tabela 7 ilustra métodos construtivos de correção destas patologias.

Tabela 7 - Problemas de corrosão de armaduras e métodos construtivos de correção

Fatores de corrosão de armadura	Métodos construtivos de correção
<b>Restauração da armadura:</b> cria-se condições químicas na superfície da armadura com o objetivo de manter ou restaurar as condições da armadura	Aumento do cobrimento das armaduras com adição de concreto ou argamassa, substituição do concreto carbonatado, realcalinização do concreto carbonatado, extração eletroquímica de cloretos
<b>Aumento da resistividade:</b> aumenta-se a resistividade elétrica na superfície do concreto	O teor de umidade da estrutura é limitado por intermédio de tratamentos da superfície do concreto, melhoria nos revestimentos ou aumento de cobrimento da armadura
<b>Controle catódico:</b> são criadas condições para que áreas potencialmente catódicas da armadura não produzam reações anódicas	O teor de oxigênio no cátodo é limitado por intermédio de revestimento na superfície da estrutura
<b>Proteção catódica:</b> controla a corrosão de uma superfície metálica, onde o metal de sacrifício é corroído ao invés de haver corrosão no metal a ser protegido	Aplicação de potencial elétrico
<b>Controle de áreas anódicas:</b> são criadas condições para que áreas potencialmente anódicas da armadura não contribuam para reação de corrosão	Executa-se pintura das armaduras com revestimentos que funcionem como barreiras para a reação química, aplicação de inibidores destas reações no concreto

Fonte: EN 1504-9 (2008) adaptado.

Comparando-se a normatização europeia em relações aos modelos de análise do Brasil, Helene et al (2017) além de elaborar análise de degradação de concreto e degradação de armadura, também fazem análise de fatores globais de degradação da estrutura. Os autores propõem modelo de análise dos tipos patologias estruturais ao definir cada tipo de patologia e analisar suas ocorrências devido a problemas globais de estruturas, deterioração de concreto e ruína da armadura. A análise foi elaborada considerando-se os mecanismos que ocorrem com mais frequência e que mais contribuem para problemas estruturais, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Definição e ocorrência de patologias na estrutura global, concreto e aço

<b>Ações preponderantes de ruína da estrutura global</b>	Englobam todo tipo de ação mecânica sobre a estrutura, movimentações de fundações, efeitos térmicos, impactos externos, fadiga e fluência da estrutura
<b>Ações preponderantes de deterioração do concreto</b>	<p><b>Lixiviação:</b> ocorre por intermédio da passagem de água pelo interior do concreto, que carreia compostos da pasta do cimento. Tal patologia acarreta a exposição de agregados e o aparecimento de eflorescências, com redução do pH do concreto e aumento do risco de corrosão de armaduras.</p> <p><b>Expansão por ações de sulfatos:</b> existem em decorrência da contaminação do concreto por sulfatos, ocasionando reações expansivas e aparecimento de fissuras, redução da dureza da superfície do concreto e redução do pH do concreto</p> <p><b>Expansão por reações entre álcalis e agregados:</b> possuem origem em função da reação química entre álcalis presentes na pasta de cimento, compostos dos agregados do concreto e silicatos hidratados da pasta. Tal reação é potencializada na presença de elevada umidade. Ocasiona expansão geral do concreto, fissuras superficiais, profundas e aleatórias em estruturas de massa contínua e ordenadas no caso de estruturas delgadas</p> <p><b>Reações deletérias superficiais de agregados:</b> decorrentes da presença de produtos ferruginosos na composição de alguns agregados, principalmente pirita. Acarretam manchas ferruginosas, cavidades e saliências na superfície do concreto</p>
<b>Ações preponderantes de deterioração de armadura</b>	<p><b>Despassivação por carbonatação:</b> ocorre devido à penetração de gás carbônico na estrutura e reação com os hidróxidos alcalinos, reduzindo o pH do concreto. O processo é agravado por ambientes que apresentam alta umidade. Este fenômeno pode ocasionar corrosão, aparecimento de manchas, soltura de pedaços de concreto, perdas de aderência, diminuição de seção resistente e colapso parcial ou total da estrutura</p> <p><b>Despassivação por cloretos:</b> origina-se devido à penetração de íons de cloro na estrutura, que reduzem a resistência do concreto e corroem a armadura, ocasionando aparecimento de manchas, soltura de pedaços de concreto, perdas de aderência, diminuição de seção resistente e colapso parcial ou total da estrutura</p>

Fonte: Helene et al. (2017) adaptado.

A norma EN 1504-10:2010, Aplicação local de produtos e sistemas e controle de qualidade de obras, trata da fase final da intervenção civil, que se inicia no momento da execução dos serviços de reparação estrutural até a finalização do plano de manutenção. É preconizado que todos os equipamentos e condições de higiene e segurança devem ser verificados e deve ser

feito controle de qualidade dos materiais e serviços, pautados na análise dos ensaios laboratoriais e no plano de fiscalização e aceitação de serviços executados. Após a aceitação final da obra, elabora-se o plano de manutenção, que deve conter datas e critérios de inspeção para cada local e equipamento da estrutura.

## 2.5 PRINCÍPIOS DE CIÊNCIAS DE MATERIAIS APLICADOS À SOLUÇÃO DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS DE CONCRETO

De forma a atenuar o surgimento de anomalias estruturais, Helene et al. (2011) mostram o avanço da crescente demanda de materiais que possam atender às expectativas do mercado, de projetistas e também que possam corresponder a busca por estruturas mais arrojadas. Os pesquisadores propõem a utilização de concretos que apresentem melhor desempenho em relação aos convencionais, como maneira de viabilizar projetos, melhorar o funcionamento de estruturas e garantir que as estruturas atinjam a vida útil predeterminada. Os autores concluem que há um vasto campo de utilização destes materiais, pois há necessidade crescente de melhoria das técnicas construtivas e dos materiais empregados.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a modernização dos materiais e avanço em pesquisas permitiu a utilização de aditivos superplasticificantes, que possibilitou o desenvolvimento de concretos autoadensáveis. Este concreto apresenta alta trabalhabilidade e pode ser utilizado em estruturas com alta densidade de aço, estruturas pré-moldadas, paredes de concreto e reservatórios em geral, desde que observada sua correta dosagem.

Ao analisar-se parâmetros de resistência e dosagem, Ashtibadfarid e Afrasiabi (2017) afirmam que a utilização de relação água/cimento na faixa de 0,35 a 0,40 é adequada para produção de concretos para projetos de reservatórios de água potável. Os autores afirmam que esse intervalo de valores é adequado para produção de concretos com baixa permeabilidade, em contato constante com a água.

A percolação de água ocasiona muitos danos à vida útil dos reservatórios, portanto, deve-se escolher produtos e métodos adequados para a correta impermeabilização da estrutura. As considerações feitas por Guimarães et al. (2011) mostram importância da escolha do método de revestimento correto para estruturas diretamente em contato com a água. Produtos escolhidos

para proteção superficial do concreto devem ser criteriosamente analisados, pois soluções hidrofugantes, que possuem água como solvente, apresentam menor eficiência na vedação de água para o interior da estrutura. O autor ainda afirma que produtos hidrofugantes, independentemente de sua composição, apenas dificultam a passagem de água e não são indicados para conter o avanço de água sobre pressão. Conclui-se que tais produtos apresentam bom desempenho para conter águas que correm livremente sobre superfície de estruturas, tais como águas pluviais superficiais, porém não se deve utilizar tais produtos em substituição à impermeabilização de reservatórios.

Ao se abordar o tema de proteção superficial do concreto, utilizando-se outro método de vedação de passagem de água, Reiterman e Pazderka (2016) avaliaram a eficiência do revestimento cristalizante Xypex concentrado, que é um produto para tratamento químico, proteção e reparo do concreto, composto de cimento portland, areia fina com granulometria previamente dosada e aditivos químicos, que reagem com a umidade do concreto e causam uma reação catalítica que gera cristais não solúveis em poros, vias capilares e juntas do concreto, selando a estrutura e impedindo o avanço de água e demais líquidos, mesmo sob alta pressão hidrostática. Os autores elaboraram um modelo experimental que possibilitou a avaliação do processo de cristalização, realizando-se testes de absorção de água e variando-se as profundidades de percolação de água em relação à superfície do concreto. Observou-se que a aplicação destes produtos acarretou uma reação química que produziu crescimento de cristais em forma de agulha dentro dos poros de concreto. Com esta vedação dos poros, houve o efeito de impermeabilização do material.

Foi verificado que o revestimento cristalino alterou a estrutura do concreto à profundidade medida, resultando na criação de uma estrutura externa de concreto impermeável. Foi discutido que o revestimento se mostrou muito eficiente para proteção das camadas superficiais do concreto e confirmou a hipótese de cristalização de camadas superficiais, proposta pelo fabricante. Portanto, este produto pode ser utilizado na construção de novos reservatórios de concreto e na reparação de problemas destas estruturas.

De acordo com Cappelesso et al. (2016), o fator que mais contribui para a diminuição da durabilidade do concreto é a permeabilidade da água, onde a taxa de deterioração é intensificada de acordo com a facilidade que a água penetra no material. A água se transporta para dentro da estrutura devido à permeabilidade do concreto, difusão de gás, difusão e migração de íons de

cloro e fenômenos capilares. Assim, para se garantir durabilidade do concreto é essencial conter a entrada de fluidos na estrutura, por intermédio do desenvolvimento de concretos menos porosos, com utilização de sílica ativa ou produtos impermeabilizantes na produção do concreto. As autoras afirmam que uma alternativa eficiente para proteção de concretos é a impermeabilização por intermédio de produtos cristalizantes, que agem na formação de cristais, ocasionando selagem dos poros do concreto, preenchendo microfissuras e impedindo a penetração de agentes agressivos na estrutura, contudo permitem a evaporação de água do interior do concreto.

Segundo as autoras, o revestimento com aditivo cristalizante é recomendado para estruturas que são submetidas a agentes agressivos e necessitam de grande durabilidade, tais como reservatórios de água, estações de tratamento de água e esgoto, barragens e demais estruturas em constante contato com fluidos. A aplicação de aditivo cristalizante foi feita em duas demãos em concretos produzidos sem aditivos, o que possibilitou testar o desempenho da impermeabilização cristalina.

Foi concluído que para estruturas que estão em constante contato com umidade, a utilização de sílica ativa na produção do concreto se mostra muito vantajosa, pois aumenta a resistência à compressão, reduz os vazios e absorção de água do material. Outra técnica que pode ser utilizada é a aplicação de aditivos cristalizantes no revestimento desse tipo de estrutura. Porém deve ser lixada a superfície de aplicação, pois notou-se que as superfícies que não foram lixadas não permitiram a passagem do vapor para o exterior da estrutura, e assim, não atingiram a finalidade proposta pelo aditivo cristalizante, que é impedir a penetração de água na estrutura e permitir a passagem de vapor para o exterior.

Ao se aplicar o estudo realizado por Cappelesso et al. (2016) e Reiterman e Pazderka (2016) na execução de reservatórios de concreto, nota-se que além do controle de qualidade dos materiais, deve-se especificar no projeto estrutural um concreto com adição de sílica ativa, com posterior lixamento de sua superfície e aplicação de aditivo cristalizante com no mínimo duas demãos.

Além do efeito da percolação de água deve-se analisar o efeito da exposição da estrutura ao gás carbônico. Oliveira e Nogueira (2016) analisaram ocorrência de carbonatação em uma parte do sistema de transposição da barragem de Tucuruí. Devido às condições de operação, este

componente de concreto trabalha sujeito às variações do nível de água, caracterizando condições de ocorrência de carbonatação e desgaste superficial do concreto. Salienta-se que segundo com Mehta e Monteiro (2014) quando o pH do concreto atinge valores inferiores à 11,5, há destruição da película passivadora, portanto inicia-se o processo de corrosão na estrutura. A análise dos autores revela que devem ser previstos processos de tratamento e realcalinização de estruturas durante sua operação.

Yeih e Chang (2005) explicam que o processo de realcalinização realiza o efeito inverso da carbonatação e pode restaurar o potencial hidrogeniônico adequado do concreto. Tal procedimento pode ser realizado de forma eletroquímica por meio de sistema anódico temporário, com instalação de campo elétrico para indução de transporte de íons.

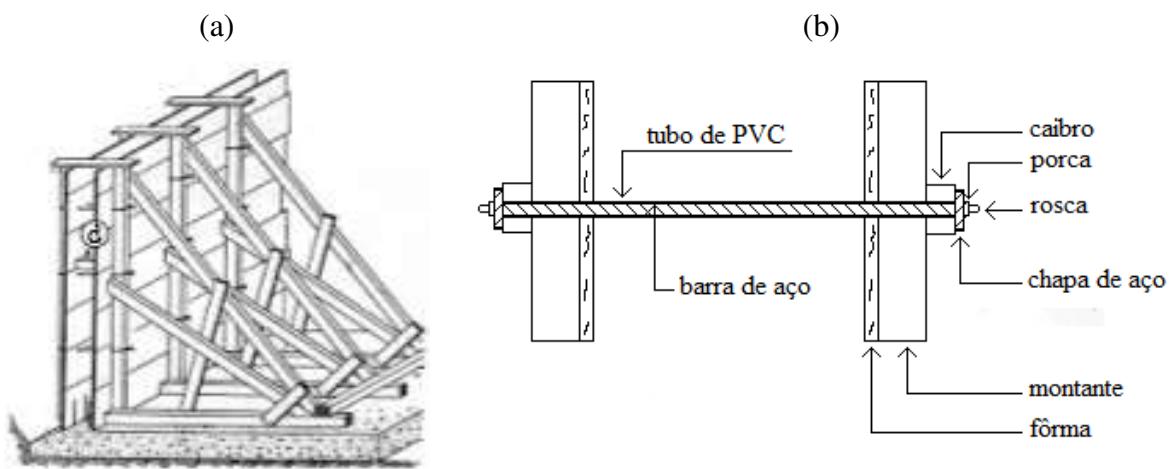
Além dos ataques de gás carbônico, Dotto (2017) demonstra que estruturas constantemente expostas a altos teores de íons de cloro tendem a sofrer severos ataques de corrosão de armaduras. Segundo Angst et al. (2011), o teor crítico de cloretos, ou seja, a quantidade de cloretos necessária para iniciar a corrosão da armadura está diretamente ligada aos fatores de fabricação do aço, fatores químicos, de composição e dosagem do concreto e fatores físicos de execução da obra, tais como cobrimento, porosidade e relação água/cimento. Os autores também informam que condições ambientais tais como teor de umidade e temperatura devem ser levadas em consideração em qualquer trabalho que envolva desempenho de estruturas de concreto.

## 2.6 MÉTODOS CONSTRUTIVOS E TECNOLOGIAS DE PREVENÇÃO DE PATOLOGIAS EM RESERVATÓRIOS DE CONCRETO

Segundo Gutiérrez (2007) fôrmas são moldes utilizados para proporcionar forma e viabilizar execução de elementos estruturais. Estas peças têm como função garantir o correto posicionamento da estrutura, proporcionar a estanqueidade do concreto lançado e evitar que o concreto perca materiais necessários ao seu desempenho. Estes elementos construtivos podem ser executados com diversos materiais e por meio de diversas técnicas. As fôrmas mais utilizadas para execução de reservatórios de concreto são de madeira, metálicas ou mistas, no entanto há o crescimento da utilização de sistemas pré-fabricados na execução deste tipo de

estrutura. A Figura 18 mostra a execução do sistema de fôrmas de madeira, que pode ser utilizado na construção de paredes de reservatórios. Este método construtivo utiliza fixadores que podem ser recuperados, pois estão protegidos por um tubo de PVC que faz a função de revestimento do fixador.

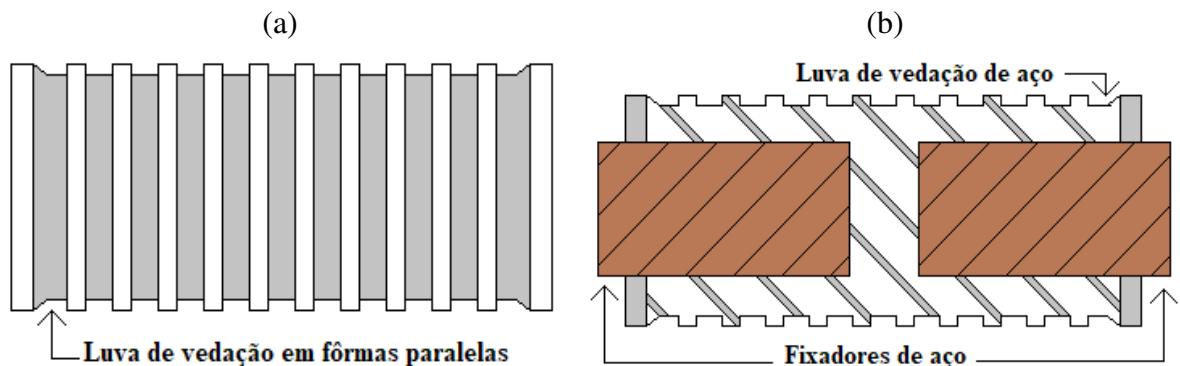
Figura 18 - Método construtivo tradicional de execução de fôrmas de madeira em paredes de reservatórios: (a) esquema geral de construção; (b) detalhe do fixador que pode ser recuperado após a concretagem



Fonte: Gutiérrez (2007) adaptado.

O autor ainda afirma que pode ser utilizado um fixador perdido, que pode ser instalado sem proteção e que após a concretagem não pode ser recuperado. Em ambos os casos, a estrutura poderá ter problemas de estanqueidade em virtude da necessidade de reparo com argamassas nos locais de instalação dos fixadores. Após a retirada do tubo ou do fixador se formará um vazio nas paredes da estrutura e consequentemente, pontos de percolação de água. Uma alternativa para diminuir a possibilidade de vazamentos nos fixadores de barra rosada é a utilização de luvas de vedação ou luvas fendidas, que são instaladas no sistema de travamento de formas paralelas. Luvas de vedação são acessórios de aço, que ficam instalados dentro do concreto e criam barreiras para passagem de água, conforme Figura 19.

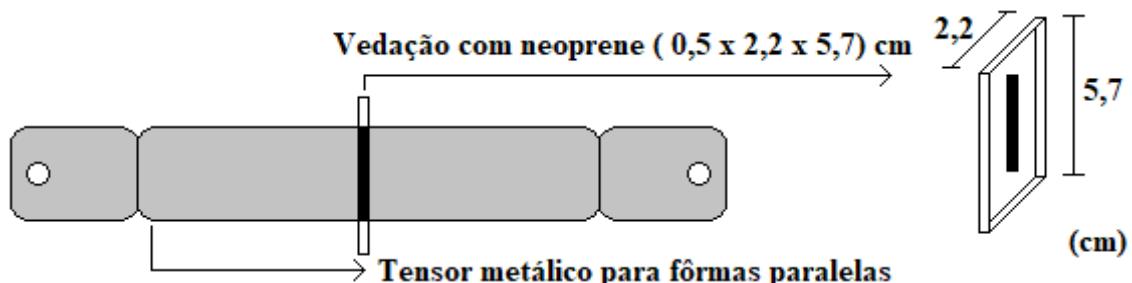
Figura 19 - Luvas de vedação de água executadas em fixadores de fôrmas de concreto: (a) vista externa da luva de vedação; (b) vista interna da luva e encaixe do fixador de fôrmas



Fonte: Gutiérrez (2007) adaptado.

Contudo, conforme a Figura 20, existe a possibilidade de instalação de tensores metálicos perdidos nas fôrmas de barra chata, com menores dimensões e menor custo de produção que contêm inibidor de passagem de água feito com elastômero de borracha, denominado comercialmente de neoprene, que possui resistência à passagem de água, grande elasticidade e resistência à abrasão.

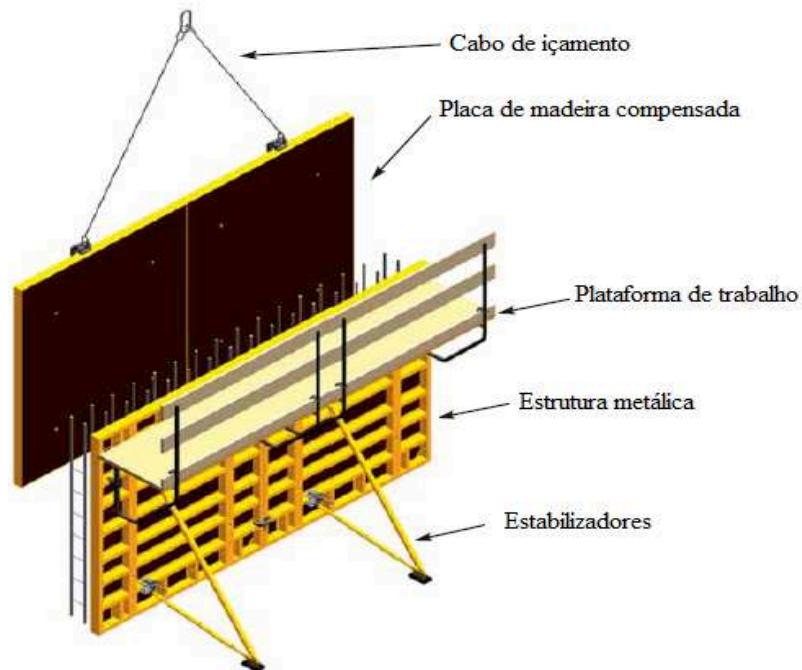
Figura 20 - Tensor metálico perdido para fôrmas paralelas e método de vedação de passagem de água com neoprene



Fonte: Gutiérrez (2007) adaptado.

Gutiérrez (2007) apresenta na Figura 21 um modelo de fôrma mista, que também pode ser utilizada na construção de reservatórios. Contudo, neste tipo de forma também se utiliza sistema de travamento e fixação similar à forma de madeira, portanto requer cuidados similares com a estanqueidade da estrutura.

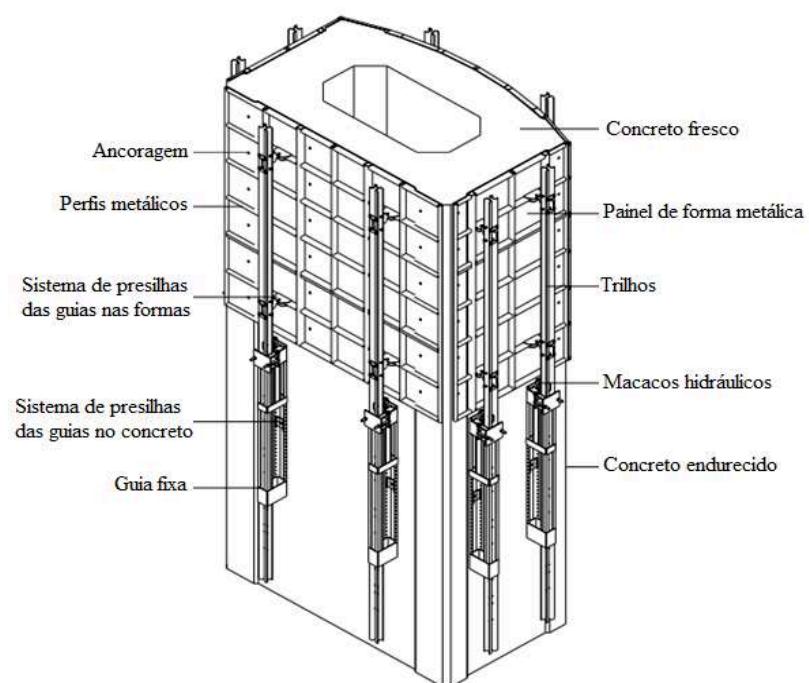
Figura 21 - Fôrma mista de madeira e estrutura metálica



Fonte: Gutiérrez (2007) adaptado.

O autor mostra na Figura 22 o sistema de formas deslizantes que podem ser utilizadas neste tipo de estrutura com a vantagem da eliminação de juntas frias, pois a concretagem ocorre de forma sucessiva e o sistema de fôrmulas é içado por macacos hidráulicos.

Figura 22 - Método de execução e componentes de forma deslizante



Fonte: Gutiérrez (2007) adaptado.

A eliminação de juntas de concretagem constitui-se em uma boa solução para supressão de problemas de percolação de água em reservatórios. Entretanto, nem sempre é viável a utilização de fôrmas deslizantes, devido ao custo ou às características da obra. Lamond (2006) apresenta tecnologias de materiais e métodos de dosagem de concreto e estuda a execução de juntas no concreto que mostra que a junta fria é o ponto crucial do desempenho da estrutura, principalmente quando se pretende executar concreto estanque.

Britez et al. (2013) realizaram trabalho de dosagem de materiais, projeto executivo e acompanhamento de execução de uma laje instalada em um subsolo, sujeita à umidade e pressões na sua superfície. Devido à necessidade de impermeabilização da estrutura e limitações de horários de lançamento de concreto, os autores produziram um material e um sistema construtivo que tivesse juntas de concretagem e ao mesmo tempo fosse estanque. Ainda, realizaram estudo de dosagem de concreto de acordo com os parâmetros requeridos para a execução da estrutura, levando-se em consideração os valores de resistência característica à compressão, trabalhabilidade e a necessidade de vedação à passagem de água (Tabela 9).

Tabela 9 - Especificações dos materiais de acordo com as características da estrutura

<b>Parâmetros analisados</b>	<b>Especificação</b>
Resistência característica do concreto à compressão	Superior à 50 MPa aos 28 dias
Relação água/cimento	Menor que 0,4
Teor de argamassa	Entre 52 e 55%
Trabalhabilidade do concreto	Slump entre 16 e 25 cm
Alta resistência do concreto e prevenção de reações álcali-agregado	Adição de sílica ativa de no mínimo de 5% na mistura
Impermeabilização	Adição de aditivo cristalizante

Fonte: Britez et al. (2013) adaptado.

Devido ao alto volume de concreto e ao risco de reações químicas exotérmicas entre o cimento e a água da mistura, os autores substituíram toda a água de amassamento da mistura por cubos de gelo na temperatura de -10 °C, com o objetivo de se evitar fissuras de origem térmica. Foi elaborada a dosagem de acordo com a Tabela 10, que contém todo o traço e as especificações técnicas do material.

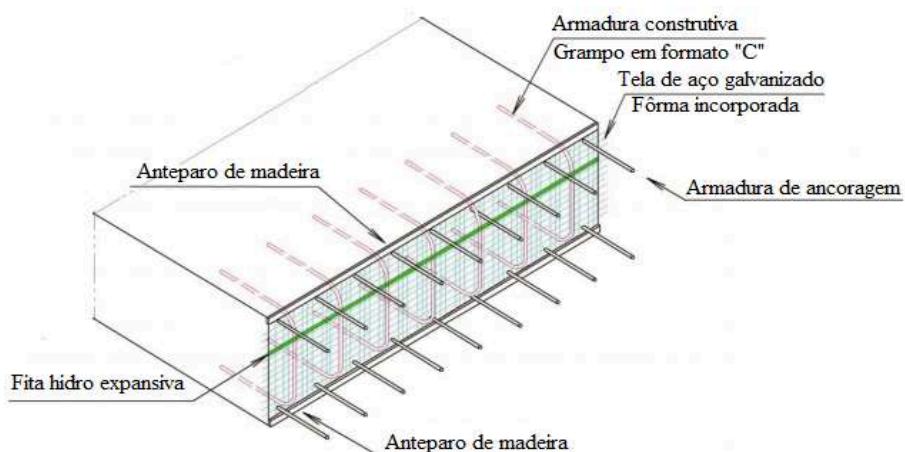
Tabela 10 - Material usado na estrutura com  $f_{ck}$  de 50 MPa aos 28 dias, para 1 m<sup>3</sup> de concreto

<b>Traço do concreto – 1 m<sup>3</sup> com relação água/cimento de 0,35</b>	
<b>Materiais utilizados</b>	<b>Peso (kg)</b>
Consumo de cimento por m <sup>3</sup>	448
Adição de sílica ativa	30
Gelo em substituição à água de amassamento (considera-se em média 5% de água presente na areia da mistura)	130
Areia média lavada	650
Areia artificial de brita tipo II	73
Brita 0	162
Brita 1	921
Aditivo impermeabilizante por cristalização Xypex 500 concentrado	4,5
Aditivo plastificante polifuncional	4,0
Aditivo superplastificante	2,9

Fonte: Britez et al. (2013) adaptado.

Após o estudo e dosagem do material foi planejado o método construtivo da junta de concretagem, que utilizou tela de aço ao longo do seu comprimento, presa com armadura construtiva tipo grampo em formato “C” e fita hidro expansiva com selante poliuretano, conforme Figura 23. A fita hidro expansiva aumenta seu volume em contato com a água, não demanda necessidade de soldagem e pode ser aplicada em vários substratos, desde sejam previamente preparados e limpos.

Figura 23 - Método executivo de execução de junta de concretagem

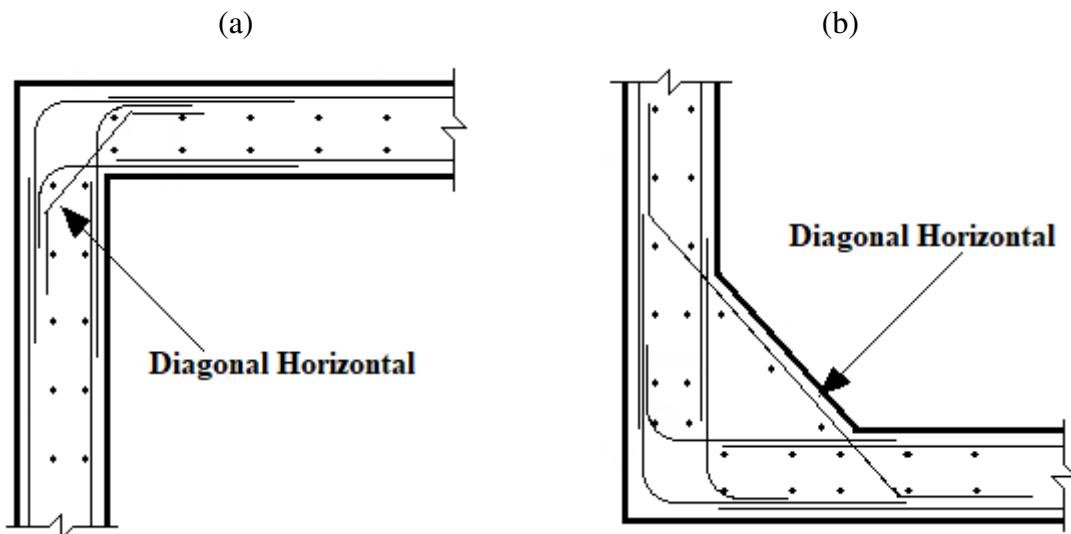


Fonte: Britez et al. (2013) adaptado.

Segundo os autores, com esse método de estudo de materiais e escolha adequada da técnica construtiva e estrutural, a execução da estrutura obteve resultado satisfatório, pois não houve incidências de fissuras ou percolação de água na estrutura, portanto tal tecnologia pode ser aplicada à execução de reservatórios que demandam juntas frias.

Referindo-se às juntas entre paredes e pisos de reservatórios, Azevedo Netto e Fernandez (2015) afirmam que arestas vivas e cantos devem ser evitados e que a melhor opção para essas junções são as arestas chanfradas. Os autores demonstram que esta medida construtiva acarreta melhor proteção sanitária ao evitar acúmulo de impurezas e também melhora o desempenho estrutural, pois protege essas regiões de quebras e possibilita melhor adensamento do concreto nessas áreas. No entanto, a norma ACI 315R-18:2018, guia de apresentação reforços de aço e detalhes de projetos, mostra modelos destas junções com mísulas, que podem ser utilizados em junções entre piso e parede de reservatórios. Pode-se optar pela utilização das junções com cantos vivos, entre paredes e lajes de cobertura de reservatórios de água, conforme Figura 24.

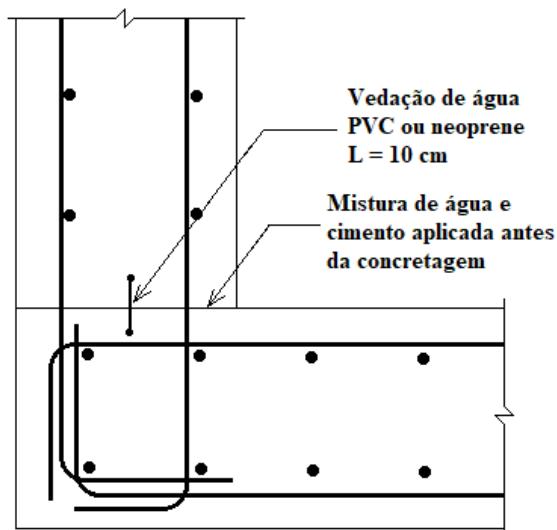
Figura 24 - Sistemas de junção entre lajes de fundo e de cobertura com paredes do reservatório: (a) junção entre parede de concreto e laje de cobertura; (b) junção entre laje de piso e parede de concreto



Fonte: ACI 315R-18 (2018) adaptado.

A norma ACI 315R-18:2018 também mostra sistema de juntas com vedação de PVC ou neoprene, que podem ser utilizadas para obter estanqueidade de estruturas que trabalham em constante contato com umidade, conforme Figura 25.

Figura 25 - Junção entre lajes e paredes com juntas de vedação de água

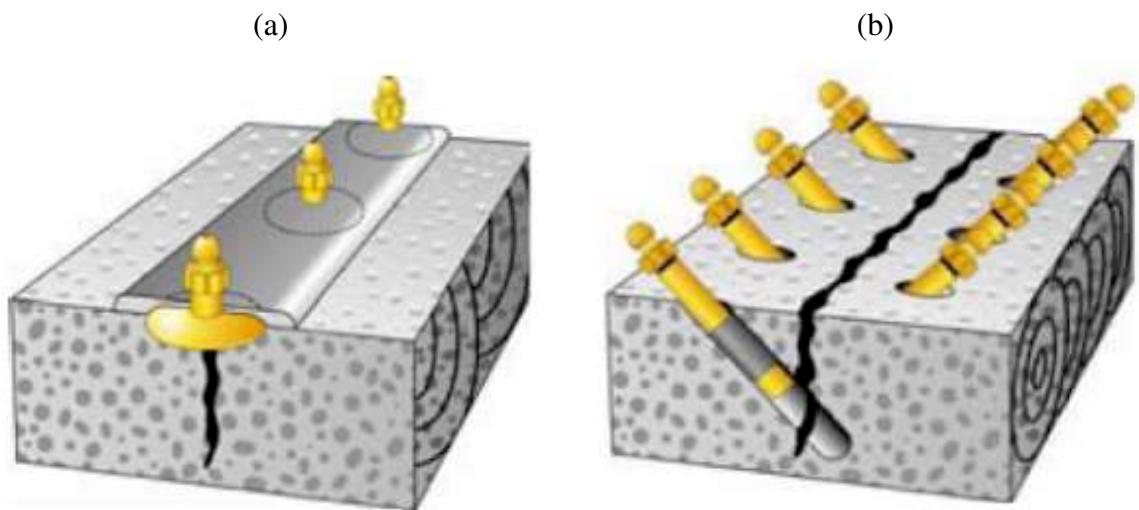


Fonte: ACI 315R-18 (2018) adaptado.

Almeida Júnior et al. (2014) afirmam que géis acrílicos poliméricos são produtos com baixa viscosidade, flexíveis, com boa aderência a substratos, de características expansivas, que aumentam o volume ao entrar em contato com a água. A aplicação destes produtos é recomendada em juntas frias, pois por intermédio de perfuração da junta e injeção do produto, pode-se garantir estanqueidade da estrutura com a formação de manta impermeabilizante na parte interna da junta de concretagem. Segundo os autores, a aplicação deste produto em juntas de concretagem garante o funcionamento estanque e monolítico do elemento estrutural.

Takagi e Ourives (2006) demonstram que se deve executar injeção de gel acrílico polimérico com bicos injetores de adesão e bicos injetores de perfuração, conforme Figura 26. Os bicos de adesão devem ser presos na estrutura com adesivo epóxi e não são indicados para aplicação em locais úmidos ou com escoamento de água sobre pressão. Os bicos de perfuração podem ser instalados em regiões úmidas e com escoamento de água sobre pressão. Ambas as tecnologias se aplicam à reservatórios de concreto e podem ser utilizadas em juntas na parte interna e externa da estrutura.

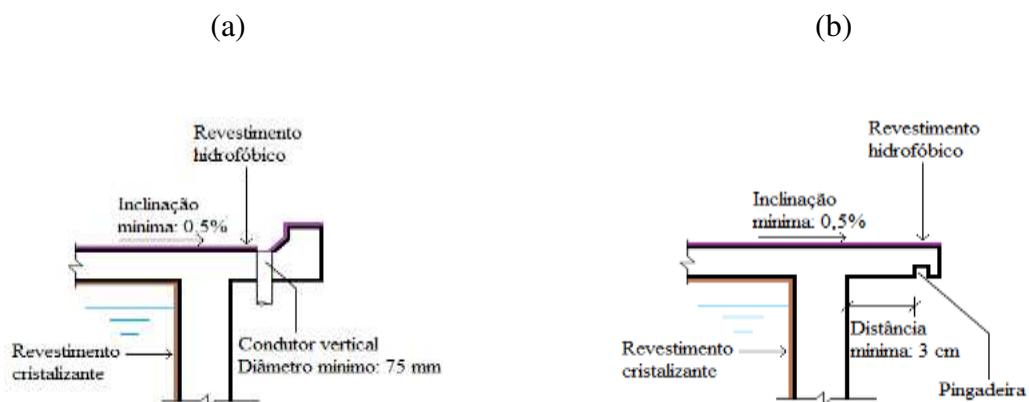
Figura 26 - Sistema de injeção de gel acrílico polimérico em reservatórios: (a) bico de adesão em áreas externas; (b) bico de perfuração em áreas internas expostas à umidade e pressão



Fonte: Takagi e Ourives (2006).

As tecnologias construtivas de vedação de água devem ser aplicadas também na parte superior dos reservatórios de concreto. Segundo a ABNT NBR 12217:1994, as coberturas de reservatórios devem proporcionar condições de escoamento natural de águas pluviais. Contudo, a ABNT NBR 10844:1989, instalações prediais de águas pluviais, preconiza que superfícies de lajes devem ter declividade mínima de 0,5% e condutores verticais necessitam de diâmetro mínimo de 75 mm. Pode-se instalar pingadeiras nas extremidades da laje de cobertura de reservatórios para diminuir a percolação de águas pluviais na estrutura, de acordo com a Figura 27.

Figura 27 - Sistema de escoamento superficial de águas pluviais em tampas de reservatórios de concreto: (a) escoamento através de condutor vertical; (b) escoamento superficial com utilização de pingadeira



Fonte: O autor.

Ao se considerar as normas vigentes e as soluções com produtos cristalizantes e hidrofóbicos, pode-se afirmar que o método construtivo aliado à solução de revestimento interno e externo podem melhorar a vida útil da estrutura ao criar impedimentos à percolação de água.

## 2.7 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Segundo Ramezanianpour et al. (2011), a durabilidade de estruturas de concreto depende diretamente da mensuração da penetração de água em seu interior. Os autores mostram que os critérios utilizados para quantificação da infiltração de água propostos pela norma inglesa BS EN 12390-8:2000, que trata da determinação de água sob pressão no concreto endurecido são válidos, porém apresentam novos ensaios e discutem que a elaboração de novos modelos e testes experimentais contribui muito para a melhoria da execução de estruturas de concreto.

Consultas ao sistema normativo europeu e brasileiro revelam critérios de análise semelhantes em relação à determinação de penetração de água sob pressão. As normas portuguesas e inglesas, pertencentes ao mesmo sistema normativo europeu, apresentam as mesmas variáveis para mensuração de infiltração de água no concreto: pressão e tempo. Observou-se que os métodos de ensaio da norma portuguesa NP EN 12390-8:2009, Ensaios do betão endurecido – Parte 8: Profundidade de penetração de água sob pressão, conjuntamente com as demais normas do sistema europeu, tais como a norma inglesa BS EN 12390-8:2000, são similares à norma brasileira ABNT NBR 10787:2011, Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão.

As normas brasileiras e europeias apresentam modelos de ensaio que se restringem especificamente à análise do comportamento do concreto. Portanto, a análise do comportamento da infiltração de água em tensores de fôrmas inseridos do concreto deve ser realizada por meio de outra metodologia, diferente do sugerido pelo referencial normativo.

Silva (2016) et al. demonstram que ensaios de durabilidade devem ser empregados na melhoria do desempenho de estruturas e materiais, porém deve-se apresentar ensaios e programas experimentais adequados a cada tipo de tema. O ensaio sugerido por normas brasileiras e europeias admitem a moldagem de apenas 3 corpos de prova por lote de concreto. Porém, para

a validação de outros testes, tais como o comportamento de elementos inseridos no concreto, necessita-se realizar planejamento experimental submetido à critérios estatísticos de validação.

## 2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo inicialmente cuidou de levantar o panorama geral de ocorrências de patologias, os dados mostraram que as principais causas de patologias estão relacionadas à problemas em projetos e erros de execução. Portanto, foram pesquisadas normas internacionais que tratam de parâmetros de projetos e execução deste tipo de obra, especialmente em países que são referências em desenvolvimento e tecnologia de estruturas de concreto. Posteriormente, foram revisadas as normas nacionais que tratam do tema e feita a comparação dos referenciais normativos brasileiros com as normas estadunidenses e europeias, de maneira a buscar melhores soluções para projetos e obras de reservatórios de distribuição de água de concreto.

Considerando-se o desenvolvimento tecnológico dos materiais empregados neste tipo de estrutura, observou-se parâmetros estudados em ciências de materiais aplicáveis à solução dos problemas patológicos deste tipo de estrutura. Foram estudadas as análises patológicas de reservatórios, caracterizações de patologias, levantamento de causas e soluções construtivas aplicadas no Brasil e no mundo.

O estudo abordou métodos construtivos e tecnologias aplicáveis à solução estrutural de prevenção destas anomalias em reservatórios. Foi observado que diversos problemas relacionados à percolação de água acontecem durante a execução da obra, especialmente na região de instalação dos tensores de fôrmas. Portanto, cuidou-se de pesquisar métodos experimentais de análise destas peças.

A análise dos referenciais normativos mostrou que o comportamento de tensores de fôrmas deve ser abordado em relação sua permeabilidade e que a validação do estudo destas peças deve ser pautada em planejamento estatístico e experimental.

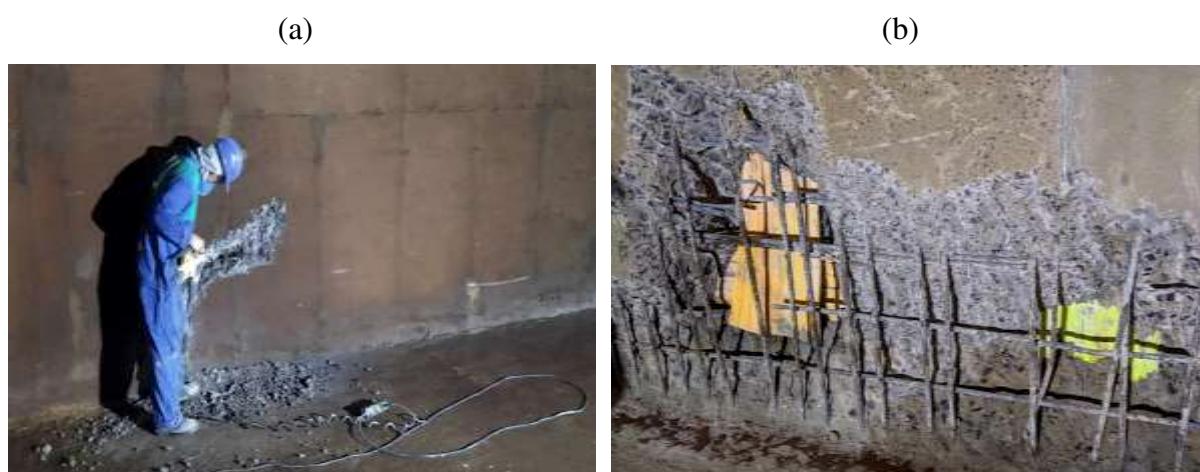
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo dedicou-se a apresentar a caracterização do programa experimental do estudo, com o intuito de avaliar a eficiência de vedação de tensores quando submetidos às pressões advindas do empuxo de água em reservatórios de distribuição. A descrição do experimento pautou-se em mostrar os materiais utilizados, procedimentos experimentais adotados e as variáveis de estudo que descrevem o comportamento destes elementos estruturais dentro do concreto endurecido em uma situação experimental de pressurização.

#### 3.1 VARIÁVEIS ANALISADAS NO EXPERIMENTO

As variáveis utilizadas no experimento foram pressão de água e tempo de aplicação de pressão. A justificativa para utilização das variáveis se embasou na análise das normas BS EN 12390-8:2000, NP EN 12390-8:2009 e ABNT NBR 10787:2011, que utilizam pressão e tempo de aplicação para quantificar a profundidade de penetração de água no concreto. Esta escolha também se pautou na constatação de efeitos destrutivos na estrutura provocados pela penetração de água, conforme apresentado na Figura 28, onde é possível observar a percolação de água em um reservatório semienterrado na Cidade de Uberlândia-MG, localizado no interior da Estação de Tratamento de Água bom jardim.

Figura 28 - Danos ocasionados por percolação de água na estrutura: (a) ruína estrutural do concreto; (b) corrosão de armaduras



Fonte: O autor.

Foi observada grande ocorrência de percolação de água no interior da estrutura nas regiões de instalação de tensores de fôrmas. Portanto, foram propostos experimentos com o intuito de testar o comportamento e a capacidade de vedação do elemento de travamento de fôrmas quando exposto às pressões entre 10 e 30 m.c.a, com variáveis de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 - Descrição das variáveis utilizadas no experimento

Descrição	Tipo	Intervalo de valores
Profundidade máxima de penetração de água	Dependente	-
Tempo de aplicação de água sob pressão	Independente	24 – 48 h
Pressão	Independente	10 – 30 m.c.a.

Fonte: O autor.

Os valores de referência só apresentam possibilidade de mensuração mediante planejamento e montagem de aparato experimental que permita estudar o comportamento da variável dependente em função das variáveis independentes analisadas.

### 3.2 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO E EXPERIMENTAL

Com o objetivo de estudar o comportamento dos tensores, optou-se pela utilização do planejamento composto central (PCC) em conjunto com o método da superfície de resposta (MSR). Segundo Zahid et al. (2018), Alves et al. (2019), Ferreira et al. (2020) e Machado et al. (2020), este método permite desenvolver e quantificar a relação entre as variáveis do experimento, possibilitando a geração de um modelo numérico e sua validação. Os autores mostram que o método de planejamento composto central é prático e comumente utilizado para cálculo de amostras, planejamento e análise dos resultados. Como foram utilizadas duas variáveis e quatro pontos centrais, o tamanho da amostra é doze e pode ser determinado de acordo com a equação (1).

$$n = 2^k + 2 * k + p \quad (1)$$

n: tamanho da amostra;

k: quantidade de variáveis independentes;

p: quantidade de pontos centrais.

De acordo com Montgomery (2012), quando se possui duas variáveis pode-se realizar o trabalho com no mínimo dois pontos centrais, entretanto foram utilizados quatro pontos centrais, com o intuito de garantir confiabilidade estatística às equações de regressão geradas. O modelo foi planejado utilizando Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), que de acordo com Barros Neto et al. (1996) apud Mattietto e Matta (2012), consiste numa técnica estatística muito adequada para estudo da otimização de desempenho de peças e processos industriais. O emprego desta técnica permite a fixação dos limites máximos e mínimos do modelo, que são definidos pela rotação ( $\alpha$ ), calculada conforme a equação (2).

$$\alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$\alpha$ : rotação do modelo, que define os valores máximos e mínimos das variáveis independentes;  
 k: quantidade de variáveis independentes;

Por intermédio do método pode-se gerar um modelo matricial, estimando-se, baseado no método dos mínimos quadrados ordinários, os coeficientes da equação do modelo obtidos por matrizes, conforme a equação (3):

$$\beta = (X^T * X)^{-1} * (X^T * Y) \quad (3)$$

$\beta$ : vetor de coeficientes do modelo;

X: matriz do planejamento experimental;

$X^T$ : matriz transposta do planejamento experimental;

Y: vetor de valores obtidos no experimento.

Segundo Montgomery (2012), Zahid et al. (2018), Alves et al. (2019), Ferreira et al. (2020) e Machado et al. (2020), a metodologia de superfície de resposta, com dois fatores gera um modelo conforme equação (4).

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_{11} * x_1^2 + \beta_{22} * x_2^2 + \beta_{12} * x_1 * x_2 \quad (4)$$

De acordo com equacionamento dos autores foi possível gerar as matrizes codificadas do modelo, conforme o sistema de matrizes (5).

$$\mathbf{X}_{[12 \times 6]} = \begin{vmatrix} Cte & X_1 & X_2 & X_1^2 & X_2^2 & X_1 * X_2 \end{vmatrix} \quad \mathbf{Y}_{[12 \times 1]} = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \end{vmatrix} \quad \boldsymbol{\beta}_{[6 \times 1]} = \begin{vmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{12} \end{vmatrix} \quad (5)$$

1	-1	-1	1	1	1
1	+1	-1	1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1
1	+1	1	1	1	1
1	$-\sqrt{2}$	0	2	0	0
1	$+\sqrt{2}$	0	2	0	0
1	0	$-\sqrt{2}$	0	2	0
1	0	$+\sqrt{2}$	0	2	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0

A matriz com os valores utilizados no experimento foi obtida por meio da decodificação dos valores teóricos do modelo, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Decodificação dos valores teóricos em relação aos valores experimentais

Valores codificados	$-\sqrt{2}$	-1	0	1	$+\sqrt{2}$
Pressão (m.c.a.)	10,00	12,93	20,00	27,07	30,00
Tempo (h)	24,00	27,51	36,00	44,48	48,00

Fonte: O autor.

De acordo com a metodologia do planejamento composto central, foi possível montar a equação de codificação do modelo em função da pressão, conforme equação (6).

$$X_1 = \frac{P-20}{7,07} \quad (6)$$

A variação do tempo de aplicação de pressão em relação às variáveis codificadas pode ser descrita de acordo com a equação (7).

$$X_2 = \frac{t-35,995}{8,485} \quad (7)$$

Com os parâmetros fornecidos no método e nas equações foi possível elaborar a matriz experimental, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Matriz do experimento em função de variáveis codificadas e não codificadas

<b>Variáveis codificadas</b>		<b>Variáveis experimentais</b>	
<b>X<sub>1</sub>(pressão)</b>	<b>X<sub>2</sub>(Tempo)</b>	<b>Pressão (mca)</b>	<b>tempo (h)</b>
-1,00	-1,00	12,93	27,51
-1,00	1,00	12,93	44,48
1,00	-1,00	27,07	27,51
1,00	1,00	27,07	44,48
-1,41	0,00	10,00	36,00
1,41	0,00	30,00	36,00
0,00	-1,41	20,00	24,00
0,00	1,41	20,00	48,00
0,00	0,00	20,00	36,00
0,00	0,00	20,00	36,00
0,00	0,00	20,00	36,00
0,00	0,00	20,00	36,00

Fonte: O autor.

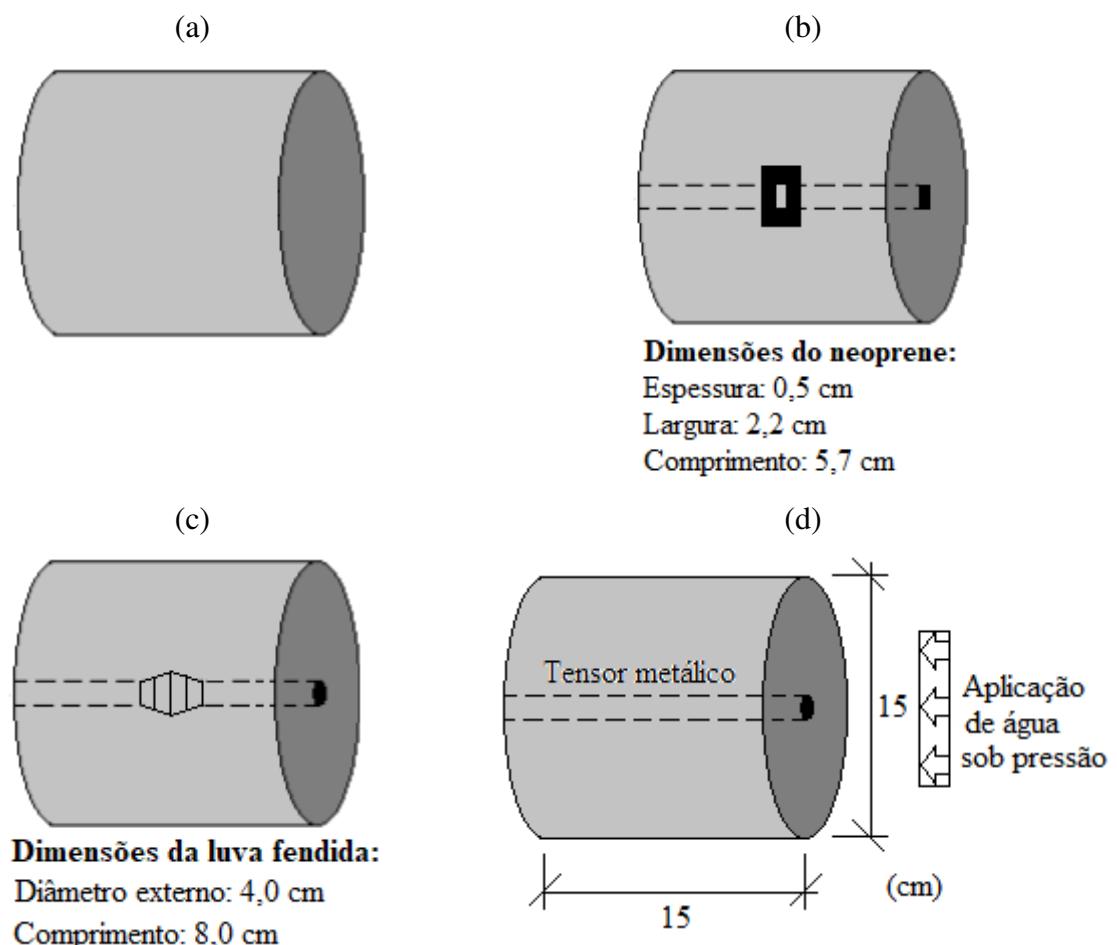
Com o objetivo de aumento da confiabilidade dos dados, foram utilizadas três repetições de cada conjunto de dados, exceto o ponto central, que já se trata de um conjunto de quatro repetições (Apêndice A, B, C). Cada corpo de prova foi numerado de acordo com o tipo de tensor em seu interior, a pressão ao qual foi submetido e o tempo de aplicação da pressão.

### 3.3 MONTAGEM E EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram utilizados no experimento corpos de prova de concreto de referência sem tensores, com tensores de barra roscada com luva fendida e de barra chata e vedação com neoprene. A concepção de montagem do experimento seguiu o mesmo modelo de corpos de prova preconizados na ABNT NBR 10787:2011. Neste caso optou-se por execução de corpo de prova cilíndrico com diâmetro e largura de 15 cm. Introduziu-se através do corpo de prova o tensor metálico, no mesmo sentido de aplicação de água sob pressão, de modo a simular a pressão no elemento de travamento de fôrmas que ocorre durante a operação da estrutura. Moldou-se corpos de provas de referência sem tensores metálicos (ST), com tensores de barra chata e

vedações com neoprene (CV), com tensores de barra roscada e utilização com luvas fendidas (RV), conforme Figura 29.

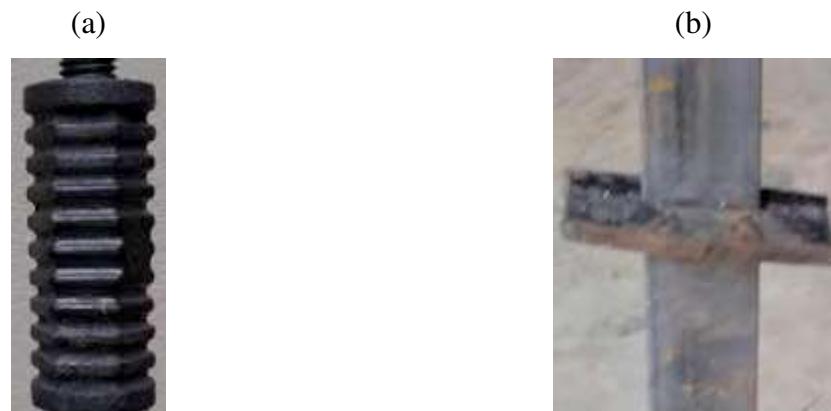
Figura 29 - Montagem do experimento: (a) corpo de prova de referência sem tensor (ST); (b) corpo de prova com tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV); (c) corpo de prova com barra roscada e vedação com luva fendida (RV); (d) dimensões do corpo de prova e esquema de aplicação de água potável sob pressão



Fonte: O autor.

Os tensores utilizados no programa experimental são de barra chata com vedação com neoprene e de barra roscada com vedação com luvas fendidas (Figura 30). Observa-se na literatura que estes tipos de tensores são usualmente utilizados na execução de reservatórios de concreto moldados *in loco*.

Figura 30 - Tensores utilizados no experimento: (a) Tensor de barra chata com neoprene; (b) tensores de barra roscada com luvas fendidas



Fonte: O autor.

Os tensores foram inseridos em fôrmas que foram obtidas de tubos de PVC de 15 cm, adaptadas e cortadas para possibilitar a execução de corpos de prova cilíndricos, conforme figura 31.

Figura 31 - Fôrmas dos corpos de prova do experimento: (a) fôrmas para moldagem de corpos de prova de referência e corpos de prova com tensores de barra chata e vedação com neoprene; (b) corpos de prova com tensores de barra roscada e vedação com luvas fendidas



Fonte: O autor.

O concreto de referência utilizado para testar os tensores foi obtido da empresa Brasmix – Engenharia de Concreto SA, que usualmente é aplicado em estruturas de armazenamento de água. O concreto tem resistência à compressão de 35 MPa, com lançamento bombeado, Slump  $120 \pm 20$  mm, relação a/c = 0,50. Com o intuito de comparar o desempenho de cada tensor, cuidou-se de utilizar o concreto nos corpos de prova do mesmo lote de produção, com as especificações de traço conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova

Materiais	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Fornecedor
Cimento	389	CP III 40 RS – Holcim
Areia fina	323	Solo novo
Areia grossa	484	Solo novo
Água	196	DMAE – Uberlândia
Brita 1	1000	BT Construções LTDA
Aditivo masterpozolit 201C	2,33 litros	Basf

Fonte: O autor.

Os corpos de prova foram moldados e enumerados com a utilização do concreto do mesmo lote (Figura 32). Como nomenclatura, definiu-se a sequência Tipo-Pressão(valor)-Tempo(valor)/(ensaio) para identificação (Apêndice A, B, C), como por exemplo: ST-P12-T27/1, referente ao primeiro ensaio do corpo de prova sem tensor sob pressão de 12,93 m.c.a durante o tempo de 27,51 horas.

Figura 32 - Corpos de prova do experimento: (a) moldagem dos corpos de prova; (b) identificação dos corpos de prova



Fonte: O autor.

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a matriz de experimentos, totalizando 84 corpos de prova (Apêndice E). Além do previsto no planejamento, foram moldados três corpos

para cada tipo de tensor. Este experimento adicional foi realizado com o objetivo de validar os modelos experimentais. Adotou-se como hipótese que a maior profundidade de penetração de água ocorreria com aplicação dos maiores valores de pressão, no maior intervalo de tempo, de acordo com os ensaios do concreto de referência fornecidos pelo Centro tecnológico de controle da qualidade Falcão Bauer. Assim, a moldagem destes corpos de prova foi feita com o intuito de efetuar o teste de validação do modelo nesta situação mais crítica.

A aplicação de água sob pressão ocorreu na bancada de hidrometria do Departamento Municipal de Água e Esgoto – DMAE, da cidade de Uberlândia-MG (apêndice D). O equipamento possibilita a aplicação de pressão em determinados intervalos de tempo. Utilizou-se um tubo de 7,5 cm para aplicação da pressão, fixado no concreto com selante adesivo monocomponente FIXTUDO transparente QUARTZOLIT. Foi feita uma redução da tubulação para adaptar o sistema de aplicação de pressão à tubulação de 2,5 cm disponível na bancada, conforme Figura 33.

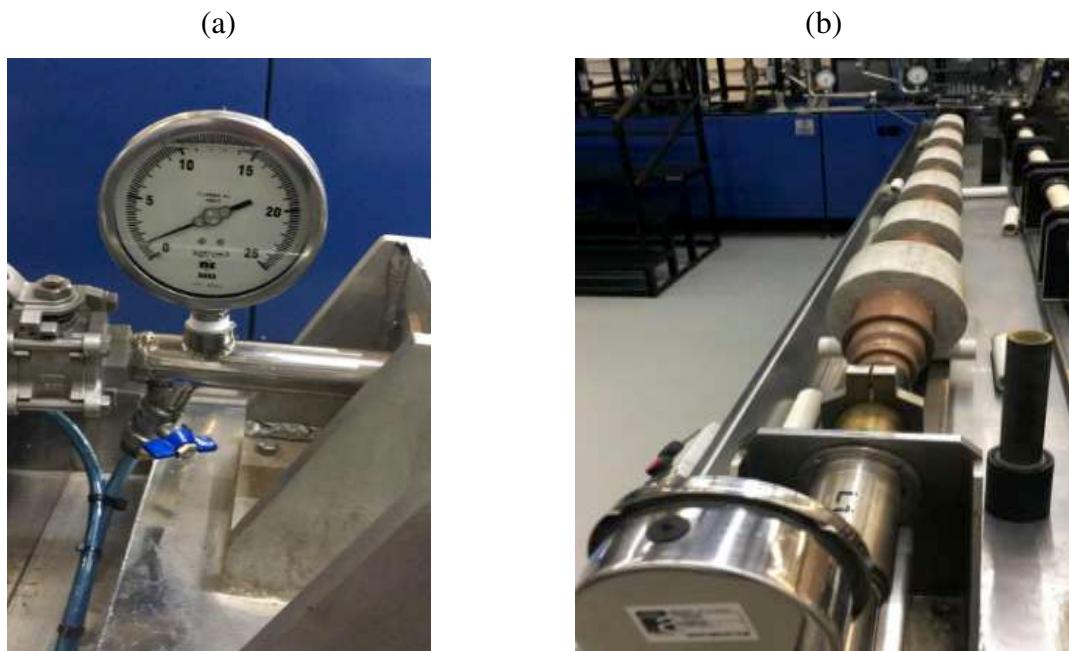
Figura 33 - Sistema de aplicação de pressão no elemento estrutural: (a) bancada de hidrometria e manômetros; (b) adaptação de tubulação para engate no corpo de prova e aplicação de pressão



Fonte: O autor.

Após decorridos 28 dias da moldagem dos corpos de prova, iniciou-se o processo de aplicação de água sobre pressão e a coleta dos resultados. A Figura 34 mostra a montagem do experimento e os manômetros utilizados para aplicação de pressão nos corpos de prova e seu posicionamento na bancada.

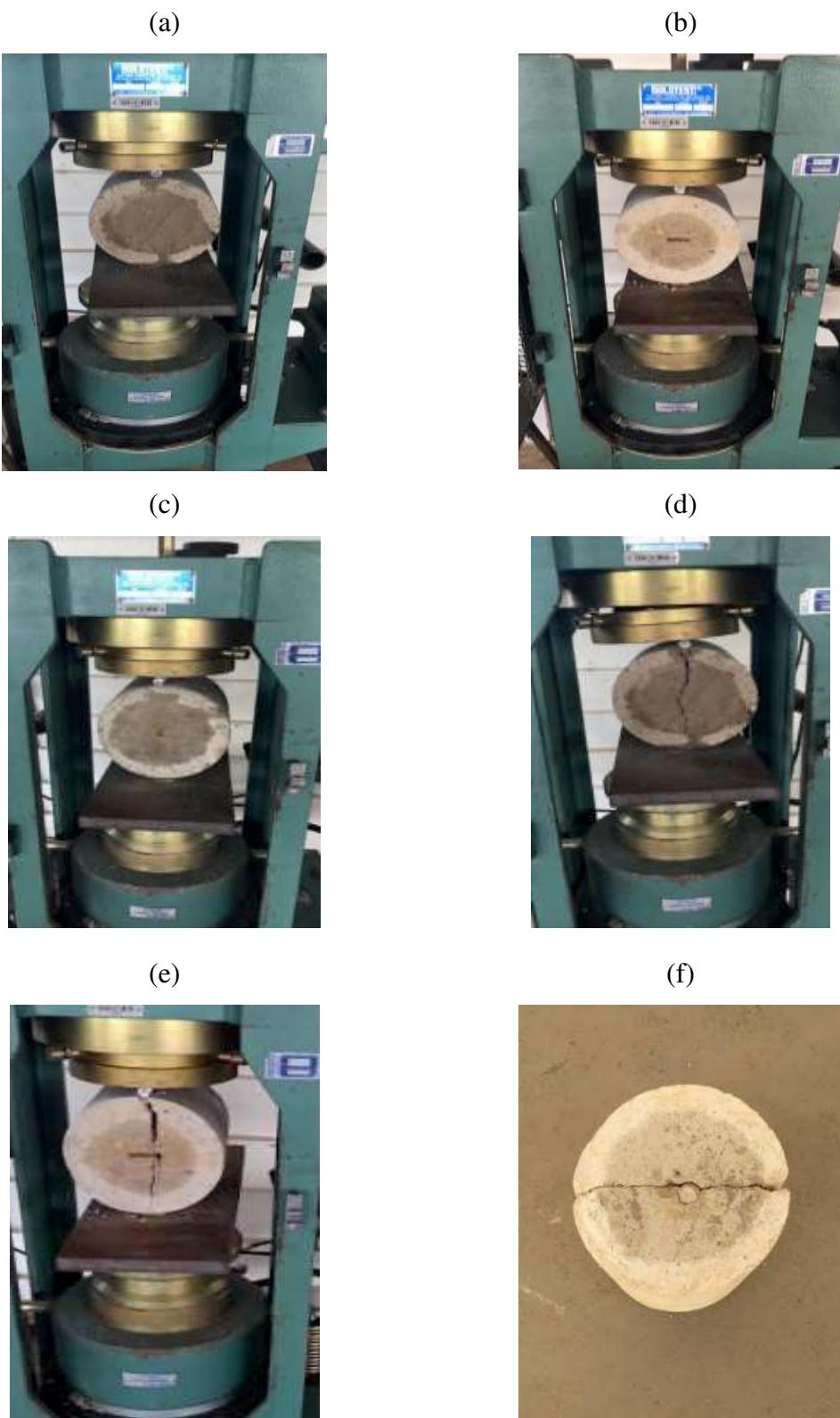
Figura 34 - Montagem e execução do ensaio: (a) manômetro para controle e medição de pressão aplicada; (b) montagem dos corpos de prova e detalhe da aplicação de pressão



Fonte: O autor.

Decorrido o tempo de aplicação de pressão em cada corpo de prova, foi feito o rompimento dos corpos de prova por intermédio de compressão diametral, com o intuito de se realizar a medição da profundidade máxima de penetração da água sob pressão. A Figura 35 mostra o método de compressão e a ruptura dos corpos de prova.

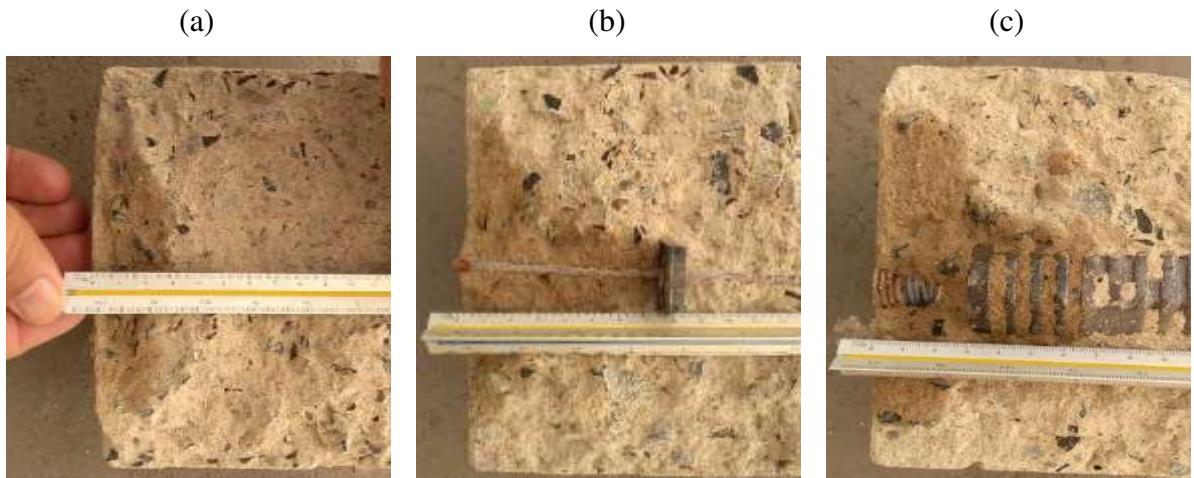
Figura 35 - Compressão e ruptura dos corpos de prova: (a) corpo de prova de referência, sem tensor; (b) corpo de prova com tensor de barra chata e vedação com neoprene; (c) corpo de prova com barra roscada e luva fendida; (d) ruptura do corpo de prova sem tensor; (e) ruptura do corpo de prova com tensor de barra chata; (f) corpo de prova de barra roscada rompido



Fonte: O autor.

Após a ruptura, obteve-se a profundidade máxima de penetração de água em todos os corpos de prova ensaiados. A Figura 36, mostra como foi feita a medição da profundidade de percolação da água.

Figura 36 - Método utilizado para medição da máxima profundidade de penetração de água nos corpos de prova: (a) corpo de prova sem tensor ST-P20-T48/2; (b) corpo de prova com tensor de barra chata e vedação com neoprene CV-P20-T48/1; (c) corpo de prova com barra roscada e luva fendida RV-P27-T44/1



Fonte: O autor.

### 3.4 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RESULTADOS

Com o objetivo de melhorar a interpretação e discussão dos resultados do experimento, a análise dos dados foi feita por meio de diversos parâmetros estatísticos, inclusive o nível de significância e confiança dos modelos.

De acordo com Barbetta et al. (2004), o nível de significância define a confiabilidade de dados produzidos por modelos estatísticos. A significância indica a probabilidade da ocorrência do valor produzido pelo modelo, portanto é medida pelo valor-*p*. Se o valor-*p* for menor que o nível de significância adotado, então aceita-se a hipótese proposta pelo modelo.

Segundo Montgomery (2012) um nível de significância de 5% é adequado para análise de dados experimentais, essa afirmativa é corroborada pela norma ABNT NBR 6118:2014, que adota nível de significância de 5% para situações experimentais. Zahid et al. (2018) ao fazer utilização de PCC e MSR adotaram nível de significância de 5%. No entanto, de acordo com Mattietto e

Matta (2012), quando se utiliza o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) se admite nível de significância de até 10%. Com o intuito de apresentar um intervalo confiável de dados do modelo, neste trabalho utilizou-se um nível de significância de 5%, ou seja, nível de confiança de 95%.

### *3.4.1 Análise de variância (ANOVA)*

Segundo Barbetta et al. (2004), a análise de variância trata-se de um método estatístico desenvolvido por Fischer, que através de testes de igualdade de médias, verifica se os fatores produzem mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse.

Segundo os autores a hipótese nula ( $H_0$ ) ocorre quando a média dos valores da variável dependente é igual para todos os grupos da variável independente, ou seja, o fator analisado não influencia a variável dependente. Por outro lado, a hipótese alternativa ( $H_1$ ) ocorre quando pelo menos uma das médias dos valores da variável dependente não é igual para todos os grupos da variável independente, ou seja, o fator analisado pode influenciar a variável dependente.

De acordo com Barbetta et al. (2004), um projeto experimental é dito fatorial quando cada nível de um fator é ensaiado com todos os níveis dos outros fatores, sem restrições. Ao considerar dois fatores A e B, com g e h sendo seus níveis respectivamente, admite-se que em cada cruzamento dos níveis desses fatores sejam realizados n replicações. As observações podem ser descritas pelo seguinte modelo estatístico, conforme equação 8.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (8)$$

Onde:

- $\mu$  é a média global da resposta;
- $\tau_i$  é o efeito do i-ésimo nível do fator A;
- $\beta_j$  o efeito do j-ésimo nível do fator B;
- $(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito da interseção entre  $\tau_i$  e  $\beta_j$ ;
- $\varepsilon_{ijk}$  é o erro aleatório ou experimental.

Na análise de variância com dois fatores, são realizados três testes estatísticos, associados às hipóteses nulas.

$H_0^{(A)}$ :  $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_g = 0$  (não há diferença no valor esperado da resposta g nível do fator A);

$H_0^{(B)}$ :  $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_h = 0$  (não há diferença no valor esperado da resposta h nível do fator B);

$H_0^{(AB)}$ :  $(\tau \beta)_{ij} = 0$ ,  $V_{i,j}$  (não há interação entre os fatores A e B).

Portanto a análise de variância pode ser calculada de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 - ANOVA com dois fatores

Fonte de variação	Soma de quadrados	gl	Quadrados Médios	Razão f
<b>Fator A</b>	$SQ_A = \sum_{i=1}^g \frac{\gamma_{i..}^2}{hn} - \frac{\gamma_{...}^2}{N}$	$g-1$	$QM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}$	$f = \frac{QM_A}{QM_{Erro}}$
<b>Fator B</b>	$SQ_B = \sum_{j=1}^h \frac{\gamma_{.j.}^2}{gn} - \frac{\gamma_{...}^2}{N}$	$h-1$	$QM_B = \frac{SQ_B}{gl_B}$	$f = \frac{QM_B}{QM_{Erro}}$
<b>Interação A *B</b>	$SQ_{AB} = SQ_{subtot} - SQ_A - SQ_B$	$(g-1)(h-1)$	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{gl_{AB}}$	$f = \frac{QM_{AB}}{QM_{Erro}}$
<b>Erro</b>	$SQ_{Erro} = SQ_{tot} - SQ_{subtot}$	$hg(n-1)$	$QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{gl_{Erro}}$	
<b>Total</b>	$SQ_{Tot} = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^h \sum_{k=1}^n \gamma_{ijk}^2 - \frac{\gamma_{...}^2}{N}$	$N-1$		

Fonte: Barbetta et al. (2004)

### 3.4.2 Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

Segundo Montgomery (2012), a análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é importante, pois este coeficiente mostra a capacidade do modelo de explicar os dados analisados e representa a qualidade do ajuste da equação de regressão. O coeficiente de determinação explica o quanto a equação de regressão representa os valores observados e pode ser expresso de acordo com a equação 9.

$$R^2 = \frac{\beta \mathbf{1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) Y_i}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})} \quad (9)$$

### *3.4.3 Análise da estimativa dos efeitos*

Saramago e Silva (2005) mostram que os efeitos calculados são significativos estatisticamente quando o valor-*p* correspondente a cada variável for inferior à 0,05, ou seja, a um nível de significância de 95%. Estes efeitos podem ser analisados por meio do Diagrama de Pareto, que consiste em um diagrama de barras, com uma linha tracejada que correspondente ao valor-*p* de 0,05.

Os efeitos padronizados (*tp*) podem ser calculados para cada variável e também para sua interação, de acordo com a equação (10), onde  $\hat{Y}$  é o valor do efeito e  $EP(\hat{Y})$  é o erro padrão do efeito.

$$tp = \frac{\hat{Y}}{EP(\hat{Y})} \quad (10)$$

### *3.4.4 Superfície de resposta*

Montgomery (2012) mostra que a relação entre a variável independente e as variáveis dependentes do modelo pode ser descrita de acordo com a equação (11).

$$Y = f(V_1, V_2, \dots, V_k) + \xi \quad (11)$$

Onde:

$Y$  é a variável resposta;

$V_k$  é o fator índice  $k$  que influencia na variável resposta;

$f$  é a função de que define a superfície de resposta.

De acordo com autor a superfície de resposta é a representação gráfica do comportamento do modelo em função das variáveis que o definem.

### *3.4.5 Validação experimental*

De acordo com Zahid et al. (2018), Alves et al. (2019), Ferreira et al. (2020) e Machado et al. (2020) a validação do modelo pode ser feita por meio do cálculo do erro entre os valores preditos e a observados no ensaio por meio da equação 12.

$$\text{erro}(\%) = \frac{(|\text{Valor predito} - \text{Valor observado}|)}{\text{Valor predito}} \quad (12)$$

De acordo com Zahid et al. (2018) se erro obtido no processo de validação for menor que 5%, o modelo é considerado válido. No entanto, de acordo com Mattietto e Matta (2012) admite-se erros experimentais de até 10% para validação de modelos experimentais.

Com a intenção de fazer a validação do modelo, foram moldados três corpos de provas de cada tipo de ensaio, de maneira a possibilitar a comparação dos valores preditos em relação aos valores observados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em todo processo experimental, com o objetivo de se observar o comportamento de cada tipo de tensor e realizar avaliação comparativa do desempenho de cada tipo de elemento estrutural. Utilizou-se como auxílio o software Statistica, versão 7.0 (Statsoft., 2004) para o tratamento dos dados.

Os dados obtidos do processo experimental possibilitaram a elaboração da Tabela 16, na qual constam os valores de profundidade de penetração de água do concreto de referência sem tensor (ST), tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV) e tensor de barra rosada e vedação com luva fendida (RV), de acordo com médias obtidas no experimento (Apêndice F, G, H).

Tabela 16 - Profundidades máximas de penetração medidas no laboratório

<b>Pressão (m.c.a)</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Profundidades máximas de penetração (cm)</b>		
		<b>Concreto sem tensor (ST)</b>	<b>Barra chata com neoprene (CV)</b>	<b>Barra rosada com luva fendida (RV)</b>
12,93	27,51	1,50	6,34	3,06
12,93	44,48	2,45	7,54	4,98
27,07	27,51	1,90	7,01	3,83
27,07	44,48	3,20	8,65	6,54
10,00	36,00	1,81	6,60	3,78
30,00	36,00	2,82	7,70	5,77
20,00	24,00	1,72	6,56	3,52
20,00	48,00	2,98	8,02	6,02
20,00	36,00	1,92	6,21	4,02
20,00	36,00	1,98	6,78	4,04
20,00	36,00	1,97	6,45	3,97
20,00	36,00	1,91	6,32	3,92

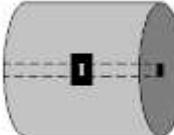
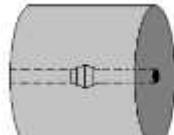
Fonte: O autor.

Os valores de profundidade de penetração de água sob pressão obtidos no ensaio permitiram o tratamento dos dados a um nível de significância de 5%, ou seja, a um nível de confiança de 95%.

## 4.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS RESULTADOS

Com o intuito de averiguar a diferença entre as médias dos fatores e observar a influência das variáveis dependentes em relação à resposta dos modelos, elaborou-se a análise de variância de todos os ensaios realizados, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) para as variáveis independentes pressão e tempo

	<b>Fonte de variação</b>	<b>SS</b>	<b>DF</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Concreto de referência sem tensor (ST)</b> 	Pressão	0,830857	1	0,830857	98,5620	0,0000060
	Pressão <sup>2</sup>	0,179701	1	0,179701	21,3173	0,003626
	Tempo	2,031240	1	2,031240	240,9598	0,000005
	Tempo <sup>2</sup>	0,219114	1	0,219114	25,9928	0,002225
	Pressão*Tempo	0,030639	1	0,030639	3,6347	0,105221
	Resíduo	0,050579	6	0,008430		
		Total	3,276800	11		
<b>Tensor de barra chata e neoprene (CV)</b> 	Pressão	1,390591	1	1,390591	26,11042	0,002200
	Pressão <sup>2</sup>	1,005276	1	1,005276	18,87554	0,004851
	Tempo	3,004140	1	3,004140	56,40719	0,000288
	Tempo <sup>2</sup>	1,391402	1	1,391402	26,12565	0,002197
	Pressão*Tempo	0,048385	1	0,048385	0,90851	0,377315
	Resíduo	0,319549	6	0,053258		
		Total	6,768500	11		
<b>Tensor de barra roscada e luva (RV)</b> 	Pressão	3,30736	1	3,307359	80,8286	0,000106
	Pressão <sup>2</sup>	0,79020	1	0,790195	19,3116	0,004596
	Tempo	8,33154	1	8,331542	203,6146	0,000007
	Tempo <sup>2</sup>	0,77863	1	0,778631	19,0290	0,004759
	Pressão*Tempo	0,15608	1	0,156081	3,8145	0,098639
	Resíduo	0,24551	6	0,040918		
		Total	13,35069	11		

Fonte: O autor.

Onde:

$SS$  = Soma dos quadrados;

$DF$  = Graus de liberdade;

$MS$  = Média dos quadrados;

$F$  = Teste Fischer de significância dos efeitos de variação;

$R^2$  = Coeficiente de determinação do modelo;

$p$  = Valor- $p$  a um nível de confiança de 95%.

A análise de variância (ANOVA) possibilitou observar que as variáveis escolhidas são significativas para quantificar a variável dependente. A análise do valor- $p$  de cada variável mostrou que as parcelas lineares e quadráticas das variáveis são significativas para o modelo. No entanto, a sinergia entre Pressão e tempo, ou seja, a parcela do modelo que trata da multiplicação destes valores, não é significativa a um nível de 95% em relação a todas as situações experimentais observadas.

Por meio da análise de variância (ANOVA) notou-se que as variáveis tempo e pressão, utilizadas pela ABNT NBR 10787:2011, norma portuguesa NP EN 12390-8:2000 e BS EN 12390-8:2000 são significativas para descrever a penetração de água na estrutura, pois em todos os experimentos o nível de confiança das variáveis independentes foi superior a 95%, quando analisadas isoladamente.

## 4.2 COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DOS MODELOS ( $R^2$ )

A análise dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) indicou o quanto a equação de regressão consegue explicar os valores observados (Tabela 18).

Tabela 18 - Coeficientes de determinação dos modelos experimentais

Ensaios	Coeficiente de determinação ( $R^2$ )
Concreto de referência sem tensor (ST)	0,98456
Tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV)	0,95279
Tensor de barra roscada e vedação com luva fendida (RV)	0,98161

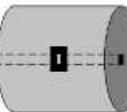
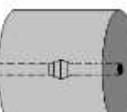
Fonte: O autor.

A análise dos coeficientes revelou que em todas as situações do experimento resultaram em coeficientes de determinação próximos à 1, que segundo Saramago e Silva (2005) demonstra que as equações de regressão explicam os dados observados de maneira satisfatória. O ensaio do concreto de referência apresentou o maior coeficiente, o que indica que dentre os ensaios realizados, este possui a equação de regressão que mais se ajusta aos dados experimentais.

### 4.3 ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS DOS EFEITOS DOS MODELOS

Esta análise mostrou em ordem decrescente as variáveis independentes que mais contribuíram para o desempenho da variável resposta, conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Análise dos efeitos em função das variáveis independentes.

	<b>Fatores</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>tp</b>	<b>p</b>
<b>Concreto de referência sem tensor (ST)</b> 	Constante ( $\beta_0$ )	1,944738	0,045907	42,36261	0,000000
	Pressão	0,644537	0,064922	9,92784	0,000060
	Pressão <sup>2</sup>	0,335131	0,072585	4,61707	0,003626
	Tempo	1,007780	0,064922	15,52288	0,000005
	Tempo <sup>2</sup>	0,370062	0,072585	5,09831	0,002225
	Pressão*Tempo	0,175041	0,091814	1,90648	0,105221
<b>Tensor de barra chata e neoprene (CV)</b> 	Constante ( $\beta_0$ )	6,439696	0,115389	55,80878	0,000000
	Pressão	0,833844	0,163184	5,10984	0,002200
	Pressão <sup>2</sup>	0,792652	0,182445	4,34460	0,004851
	Tempo	1,225590	0,163184	7,51047	0,000288
	Tempo <sup>2</sup>	0,932537	0,182445	5,11133	0,002197
	Pressão*Tempo	0,219967	0,230777	0,95316	0,377315
<b>Tensor de barra roscada e luva (RV)</b> 	Constante ( $\beta_0$ )	3,986979	0,101141	39,41992	0,000000
	Pressão	1,285955	0,143035	8,99047	0,000106
	Pressão <sup>2</sup>	0,702760	0,159918	4,39450	0,004596
	Tempo	2,041022	0,143035	14,26936	0,000007
	Tempo <sup>2</sup>	0,697599	0,159918	4,36222	0,004759
	Pressão*Tempo	0,395071	0,202282	1,95307	0,098639

Fonte: O autor.

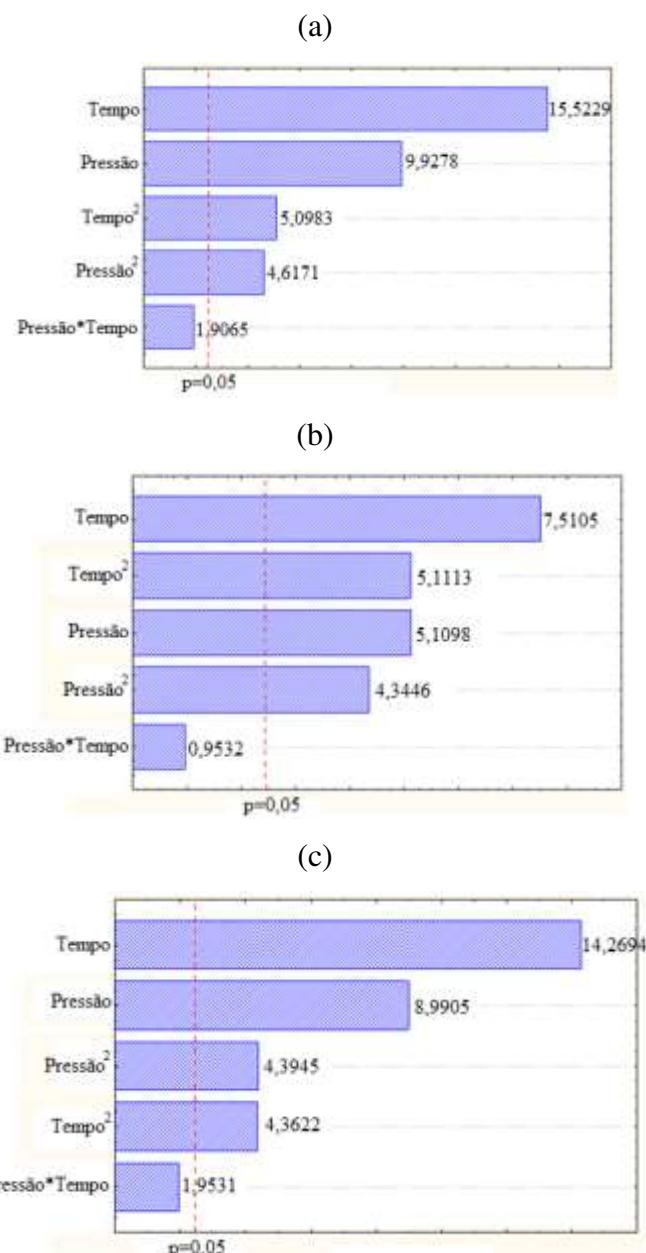
Onde:

$tp$  = Efeitos padronizados;

$p$  = Valor- $p$  a um nível de confiança de 95%.

A análise dos efeitos possibilitou a elaboração do gráfico de Pareto, que permite a análise gráfica da magnitude de cada efeito das variáveis independentes em relação à variável resposta do modelo. A linha tracejada mostrada na Figura 37 indica o valor- $p$  de 0,05.

Figura 37 - Diagramas de Pareto: (a) concreto de referência sem tensor; (b) tensor com barra chata e vedação com neoprene; (c) tensor de barra roscada e vedação com luva fendida



Fonte: O autor.

A análise gráfica dos efeitos permite concluir que o tempo de aplicação de pressão é a variável independente que mais ocasiona efeitos na variável dependente em todos os ensaios. A Figura 35 mostra ainda que os valores lineares e quadráticos das variáveis independentes também ocasionam significativos efeitos na variável independente a um nível de 95%. A interação entre tempo e pressão não foi estatisticamente significativa em todos os ensaios realizados.

#### 4.4 SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DOS MODELOS

A modelagem possibilitou a construção de modelos matemáticos empíricos, com o emprego de funções polinomiais lineares e quadráticas que simulam o desempenho dos tensores de acordo com as variações de pressão e tempo (Apêndice I).

A equação (12) representa a superfície de resposta do concreto de referência sem tensor.

$$Y = 4,616567 - 0,141025*P + 0,003352*P^2 - 0,154811*t + 0,002570*t^2 + 0,001459*P*t \quad (12)$$

Os valores da variável dependente em relação às variáveis experimentais para o tensor de barra chata e vedação com neoprene foram definidos de acordo com a equação (13).

$$Y = 15,54318 - 0,32418*P + 0,00793*P^2 - 0,43068*t + 0,00648*t^2 + 0,00183*P*t \quad (13)$$

A equação (14) representa a variação da profundida de penetração de água em relação às variáveis independentes para o tensor de barra roscada e vedação com luva fendida.

$$Y = 9,298374 - 0,308771*P + 0,007030*P^2 - 0,294359*t + 0,004845*t^2 + 0,003293*P*t \quad (14)$$

Onde:

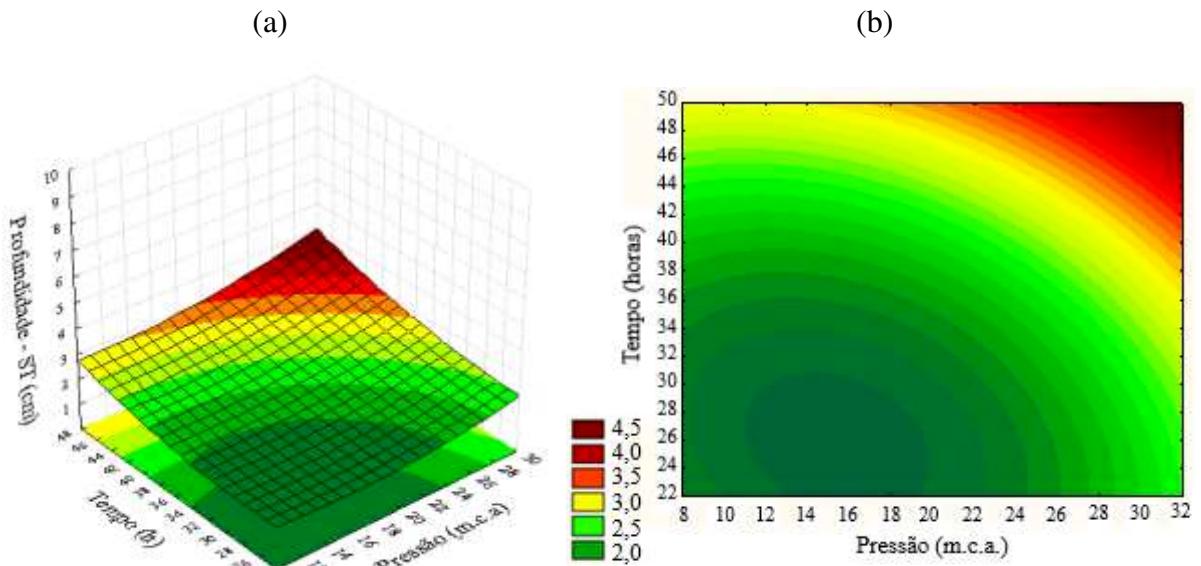
$Y$  = Profundidade de penetração de água sob pressão na estrutura;

$P$  = Pressão de água aplicada na estrutura (m.c.a);

$T$  = Tempo de aplicação de pressão (h).

Os modelos de regressão possibilitam a representação da superfície de resposta. Na Figura 38 é representado o comportamento do concreto de referência, sem instalação de tensores.

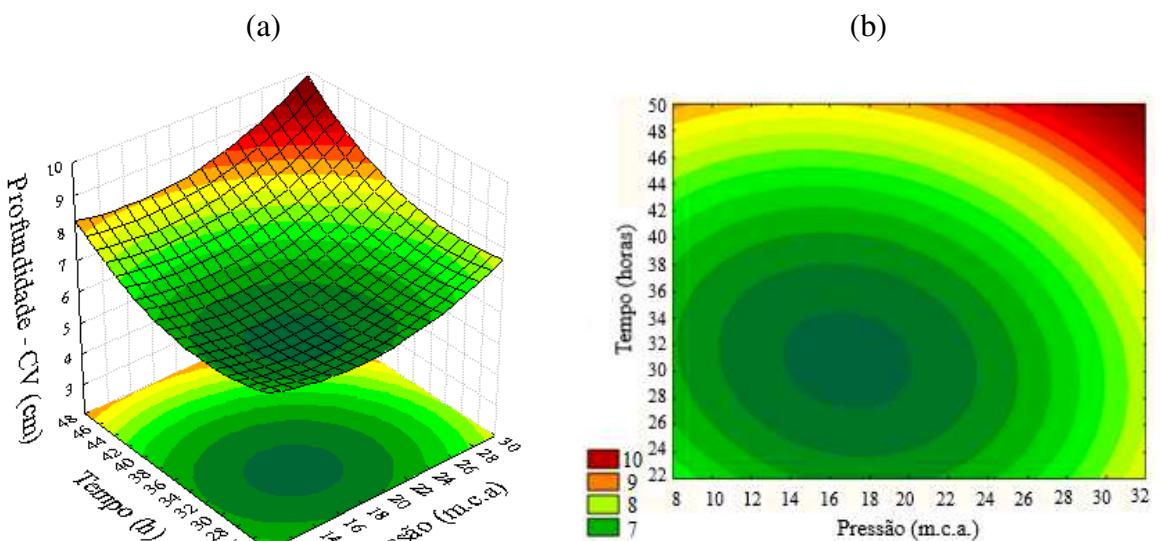
Figura 38 - Superfície de resposta do concreto de referência sem tensor (ST): (a) representação espacial; (b) representação no plano



Fonte: O autor.

O comportamento do tensor de barra chata e vedação com neoprene é mostrado na Figura 39.

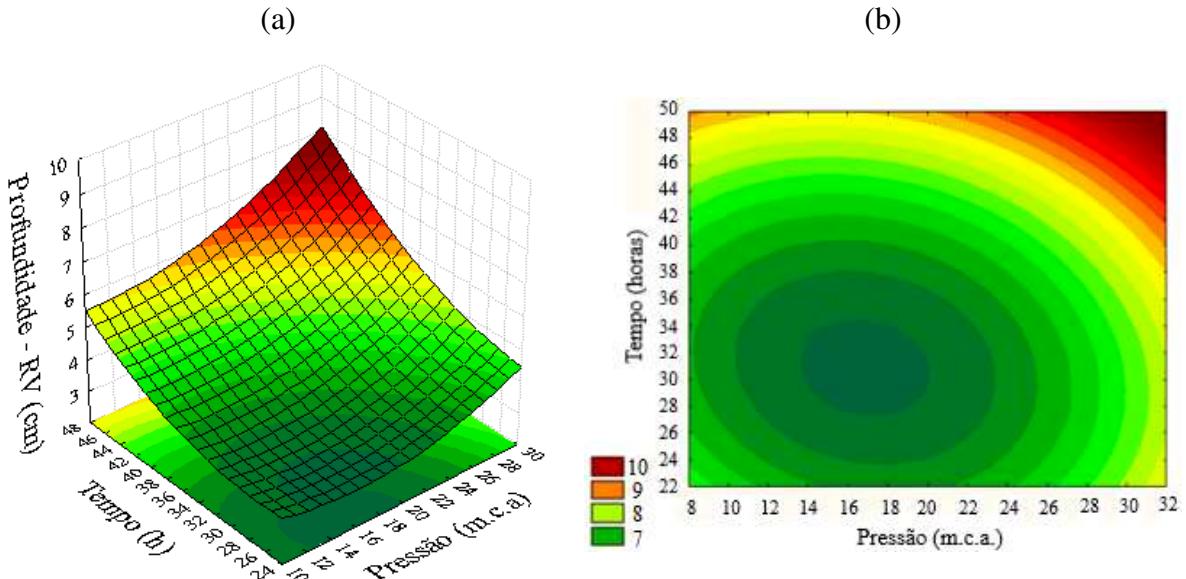
Figura 39 - Superfície de resposta do tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV): (a) representação espacial; (b) representação no plano



Fonte: O autor.

A Figura 40 possibilita a análise do comportamento da superfície de resposta do tensor de barra roscada e vedação com luva fendida.

Figura 40 - Superfície de resposta do tensor de barra roscada e vedação com luva fendida (RV):  
(a) representação espacial; (b) representação no plano



Fonte: O autor.

As equações dos modelos possibilitaram a mensuração do desempenho da estrutura em relação à pressão e o tempo de aplicação, bem como predição dos valores onde ocorreram as máximas penetrações de água na estrutura. A percolação de água máxima ocorreu para a pressão de 30 m.c.a. aplicada durante o tempo de 48 horas, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Penetrações máxima de água preditas pelos modelos experimentais com pressão de 30 m.c.a aplicada durante 48 horas

Ensaio	Valores máximos preditos (cm)
Concreto de referência sem tensor (ST)	3,99
Tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV)	9,84
Tensor de barra roscada e vedação com luva fendida (RV)	8,14

Fonte: O autor.

Observou-se por meio dos resultados dos modelos que a instalação de tensores de fôrmas necessariamente aumenta a permeabilidade de água na estrutura, porém houve um melhor

desempenho do tensor de barra roscada em relação ao tensor de barra chata, pois neste caso o tensor de barra roscada possibilitou menor penetração de água na estrutura. O alto valor de infiltração no concreto de referência nas condições mais críticas também indica que este material deve ser melhorado em relação à sua capacidade de vedação.

Os tensores foram instalados simetricamente dentro das fôrmas de concreto, de modo que o eixo do elemento de vedação coincidiu com a metade do corpo de prova. Portanto, a ocorrência de profundidades de penetração de água superiores à 7,5 cm revela que houve passagem de água através dos elementos de vedação das barras. Em todos tensores houve valores de percolação de água superiores à 7,5 cm, o que indica que as vedações com neoprene e luva fendida podem ser melhoradas.

#### 4.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A validação dos modelos foi feita por meio do cálculo do erro entre a máxima profundidade de penetração predita e a observada no ensaio em sua situação mais crítica (Apêndice J). Esta validação foi feita com pressão de 30 m.c.a aplicada durante 48 horas, conforme a Tabela 21.

Tabela 21 - Validação do modelo para o concreto sem tensor na situação mais crítica do ensaio

<b>Ensaio</b>	<b>Pressão (m.c.a)</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Profundidade predita (cm)</b>	<b>Profundidade observada (cm)</b>	<b>Erro (%)</b>
Concreto de referência (ST)	30,00	48,00	3,99	3,83	4,01
Tensor de barra chata e neoprene (CV)	30,00	48,00	9,84	9,38	4,67
Tensor de barra roscada e luva fendida (RV)	30,00	48,00	8,14	7,74	4,91

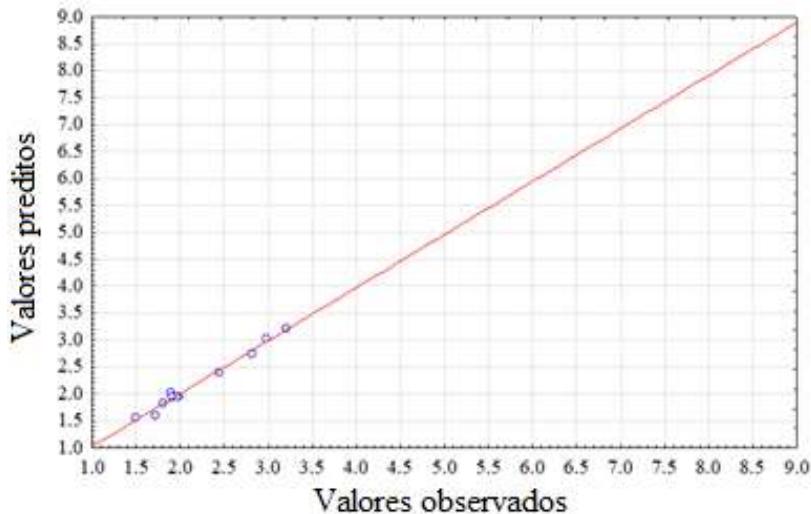
Fonte: O autor.

O erro obtido no processo de validação em todos os experimentos foi inferior à 5%, portanto todos os modelos experimentais foram validados e representam o comportamento da penetração de água na estrutura em relação à pressão e ao tempo a um nível de 95% de confiança.

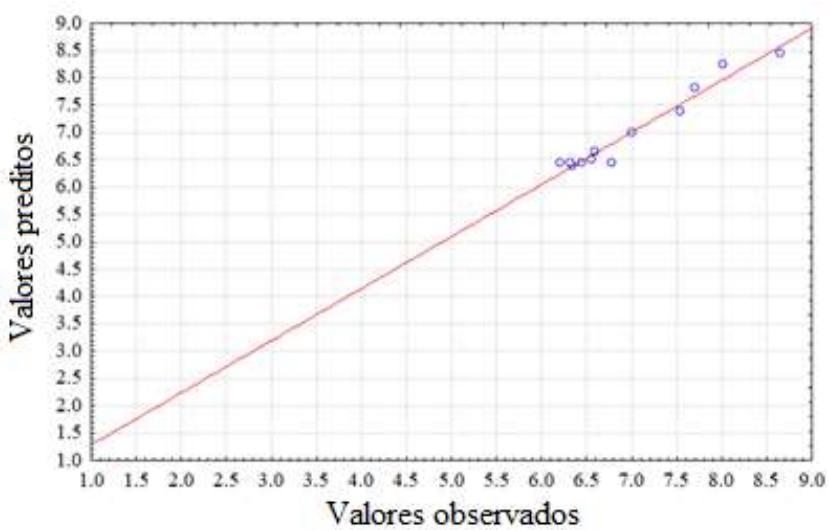
A Figura 41 possibilita a análise dos experimentos em relação aos valores preditos pelo modelo e observados experimentalmente.

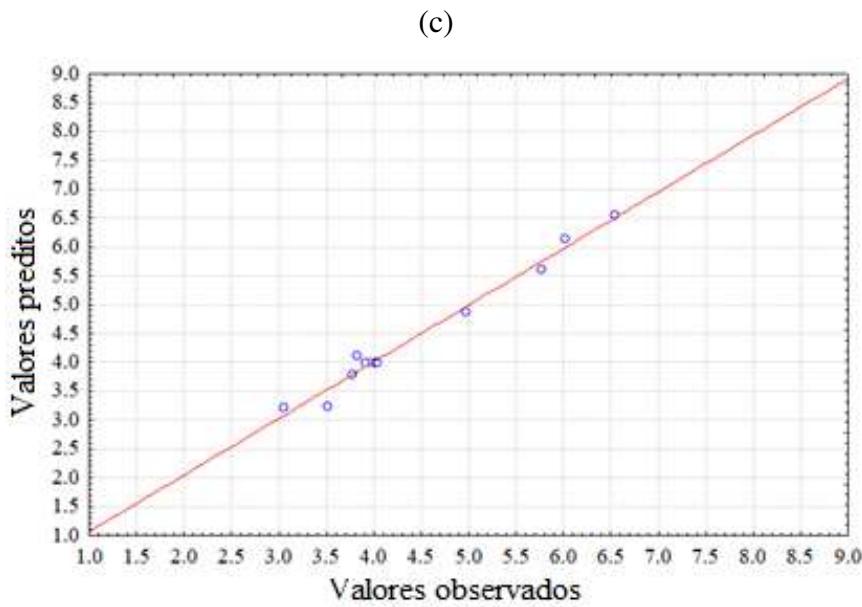
Figura 41 - Relação entre valores preditos e observados: (a) concreto de referência sem tensor; (b) tensor de barra chata e vedação com neoprene; (c) tensor de barra roscada e vedação com luva fendida

(a)



(b)





Fonte: O autor.

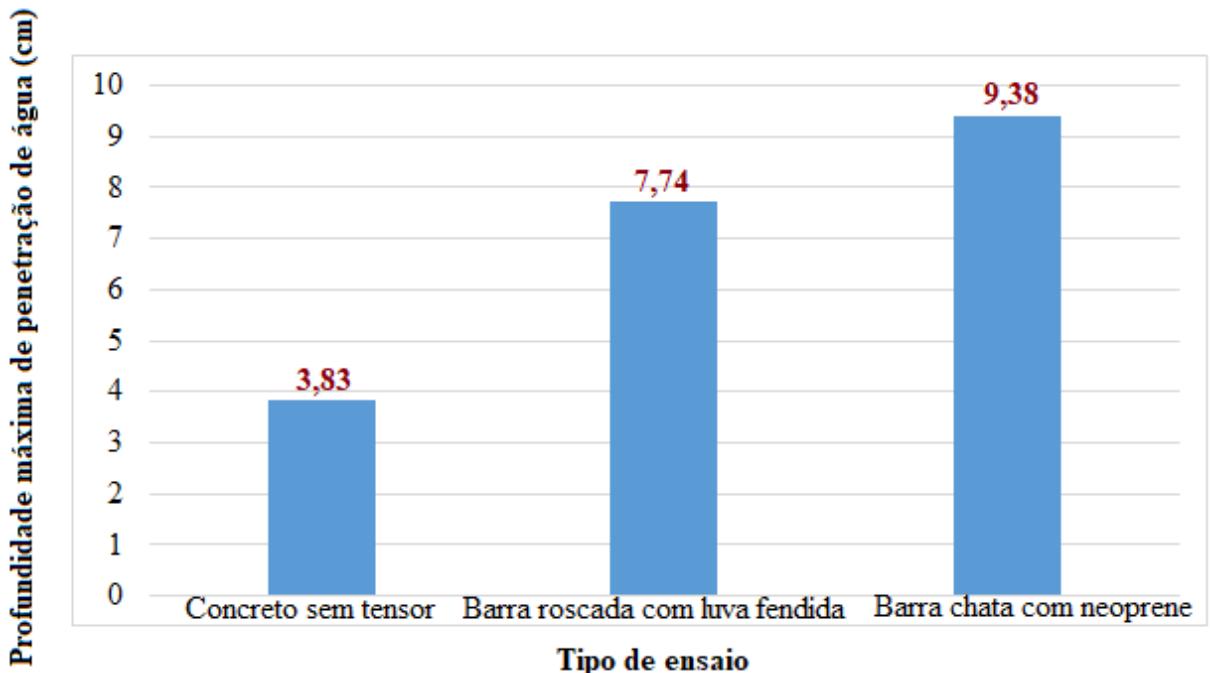
A análise gráfica permite observar que houve boa aproximação entre os valores preditos pelos modelos e os valores experimentais.

#### 4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS EXPERIMENTOS

Ao se considerar que os efeitos de infiltração de água são nocivos para o desempenho e durabilidade estrutural foi analisada qual situação proporciona menor percolação de água durante o processo de execução da estrutura. A instalação dos tensores aumenta a percolação de água através de paredes de reservatórios de água moldados *in loco*, portanto diminuem a vida útil destas estruturas.

Em relação aos tensores utilizados, notou-se melhor desempenho do tensor de barra roscada com luva fendida em relação ao tensor de barra chata com vedação em neoprene. O desempenho de cada tensor pode ser analisado conforme Figura 42.

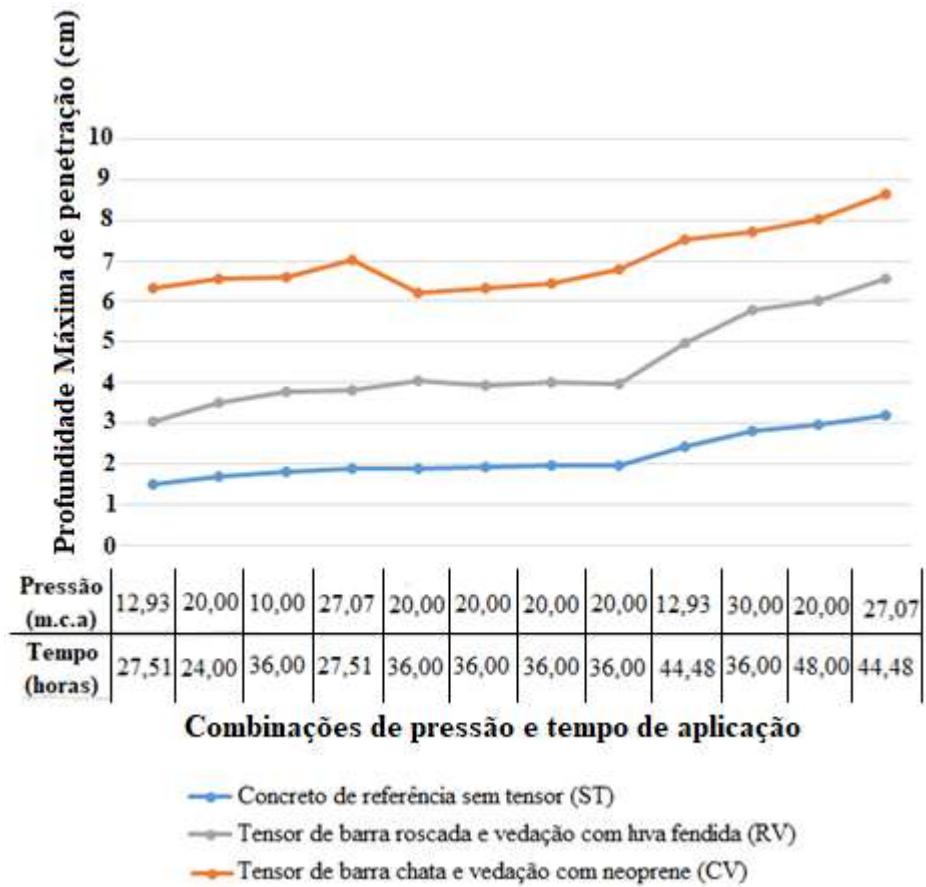
Figura 42 - Profundidade máxima de penetração de água na estrutura com a aplicação de pressão de 30 m.c.a. durante 24 horas



Fonte: O autor.

O desempenho dos tensores em relação às combinações de pressão e tempo podem ser observados na Figura 43, que demonstrou a melhor capacidade de vedação de água do tensor de barra roscada com luva fendida em relação ao tensor de barra chata com neoprene. Ambos tensores apresentaram valores de infiltração de água superiores ao concreto de referência sem tensor para todas as combinações de pressão e tempo realizadas no experimento.

Figura 43 - Desempenho dos tensores em relação às combinações de pressão e tempo



Fonte: O autor.

A execução da estrutura sem tensores para o tipo de concreto analisado se apresenta como a melhor escolha, pois a profundidade máxima de penetração de água não excedeu à espessura do cobrimento mínimo preconizado pela ABNT NBR 6118:2014.

O tensor de barra roscada com luva fendida mostrou-se eficiente, no entanto é mostrado na Figura 44 que houve percolação de água na sua lateral, na interface entre a luva fendida e o concreto, o que indica necessidade de melhoria da geometria desta peça, com possível aumento de sua seção transversal.

Figura 44 - Penetração de água no tensor de barra roscada com luva fendida



Fonte: O autor.

O tensor de barra chata com neoprene teve desempenho inferior quando comparado com o tensor de barra roscada, pois a Figura 45 revela que houve infiltração de água na junção entre o neoprene e a barra, indicando que se necessita de melhoria no método de fabricação e vedação do neoprene em relação à barra chata. O trabalho também revelou ocorrência de infiltração de água na lateral do neoprene, na interface entre o polímero e o concreto, indicando que as dimensões do neoprene devem ser aumentadas.

Figura 45 - Penetração de água no tensor de barra chata e vedação com neoprene

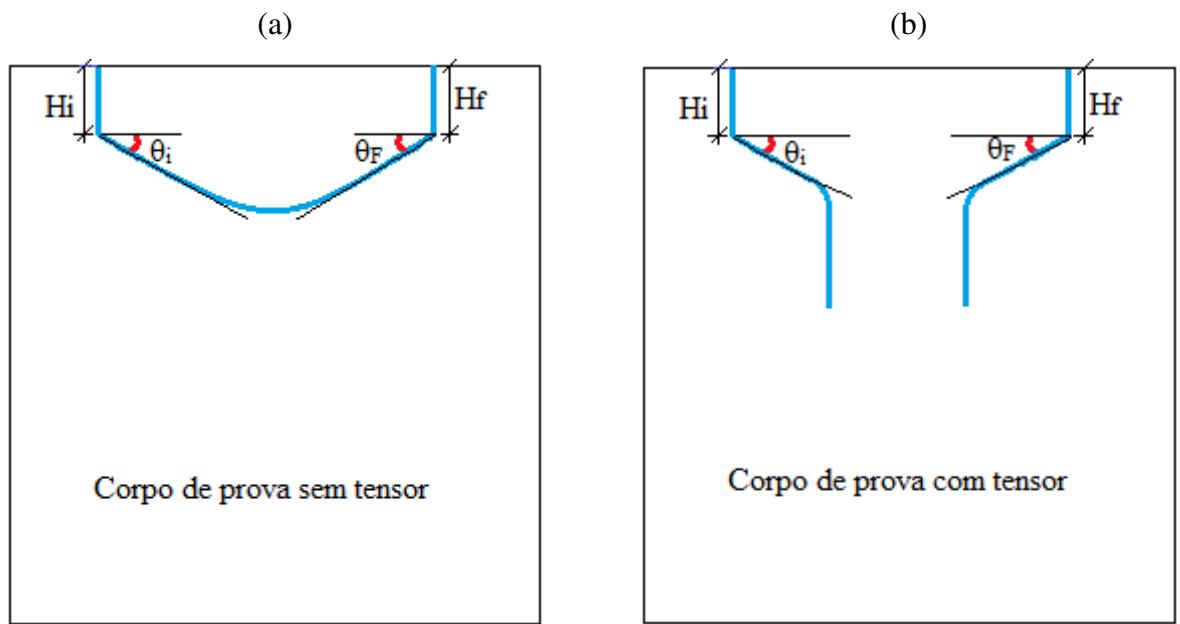


Fonte: O autor.

#### 4.7 FORMATO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO

O experimento possibilitou a análise do formato da infiltração da água de acordo com a pressão aplicada no decorrer do tempo. Este estudo foi feito levando-se em consideração a espessura média de penetração de água nas laterais ( $H$ ) e o ângulo de mudança de direção ( $\theta$ ), de acordo com a Figura 46.

Figura 46 - Variáveis analisadas na mensuração do formato de penetração: (a) concreto sem tensor; (b) concreto com tensor



Fonte: O autor.

Onde:

$H_b$  = Profundidade média de penetração nas bordas (cm);

$\theta_p$  = Ângulo médio de penetração.

A profundidade média de penetração nas bordas pode ser calculada por meio da média aritmética entre as penetrações laterais, conforme equação 15.

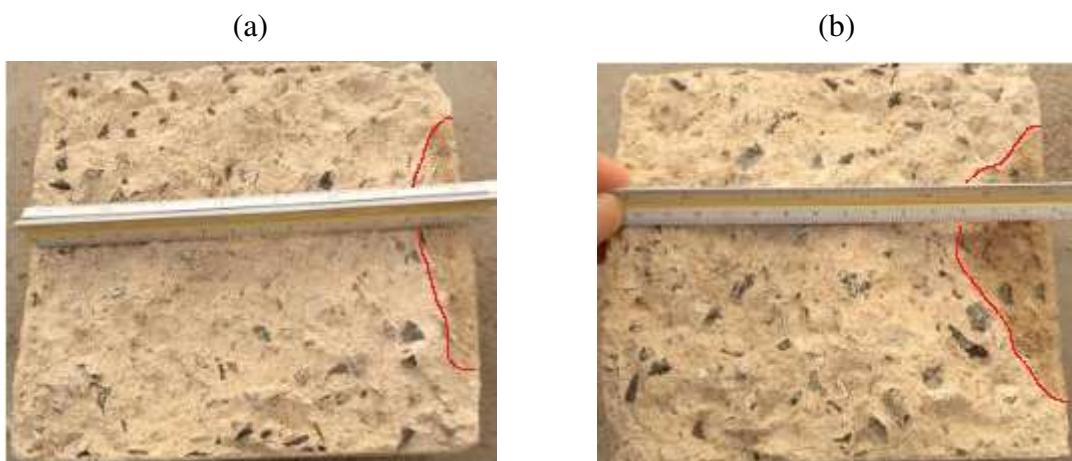
$$H_b = \frac{H_i + H_f}{2} \quad (15)$$

O ângulo médio de penetração pode ser calculado por meio da média aritmética entre os ângulos de penetração conforme a equação 16.

$$\theta_p = \frac{\theta_i + \theta_F}{2} \quad (16)$$

Os dados experimentais mostram mudança de comportamento da água de acordo com o tipo de tensor. O corpo de prova sem tensor apresentou mudanças de formato na penetração da água. A Figura 47 mostra que a profundidade de penetração de água nas bordas e o ângulo de penetração de pressão aumentam em relação à pressão e ao tempo, o que indica maior percolação de água no eixo de aplicação de pressão em relação às bordas.

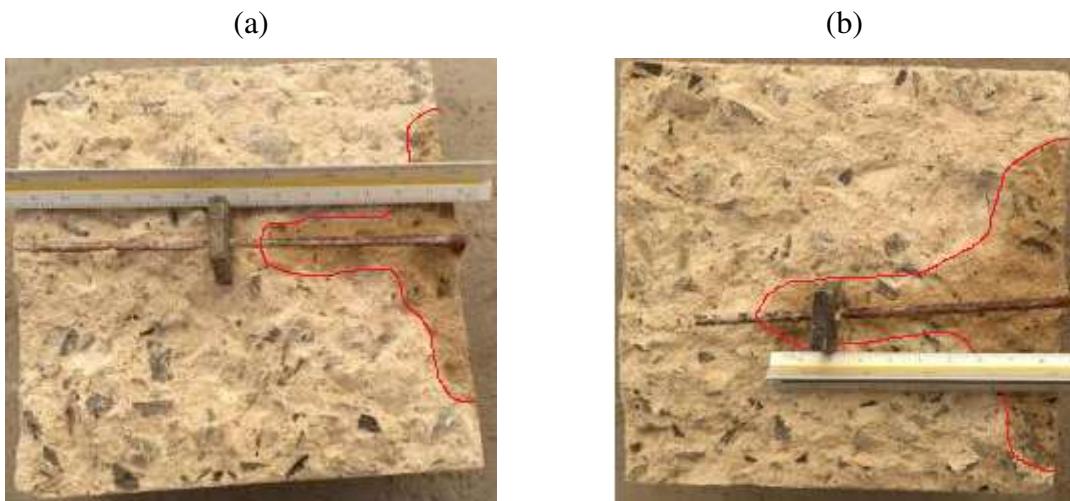
Figura 47 - Formato da percolação de água no concreto de referência sem tensor: (a) corpo de prova ST-P12-T27/1; (b) corpo de prova ST-P27-T44/2



Fonte: O autor.

O comportamento do tensor de barra chata com vedação de neoprene também apresentou mudanças no formato da percolação de água com o aumento da pressão no decorrer do tempo. Verificou-se que a percolação de água nas bordas, juntamente com o ângulo médio de penetração foram aumentados, conforme Figura 48.

Figura 48 - Formato da percolação de água no tensor de barra chata e vedação com neoprene:  
 (a) corpo de prova CV-P12-T27/3; (b) corpo de prova CV-P27-T44/3



Fonte: O autor.

O tensor de barra roscada com luva fendida seguiu a tendência do tensor de barra chata e mostrou mudanças no formato da infiltração de água no seu entorno, com o aumento da pressão no decorrer do tempo. Verificou-se que a percolação de água nas bordas, juntamente com o ângulo médio de penetração foram aumentados, conforme Figura 49.

Figura 49 - Formato da percolação de água no tensor de barra roscada e vedação com luva fendida: (a) corpo de prova RV-P12-T27/2; (b) corpo de prova RV-P27-T44/1



Fonte: O autor.

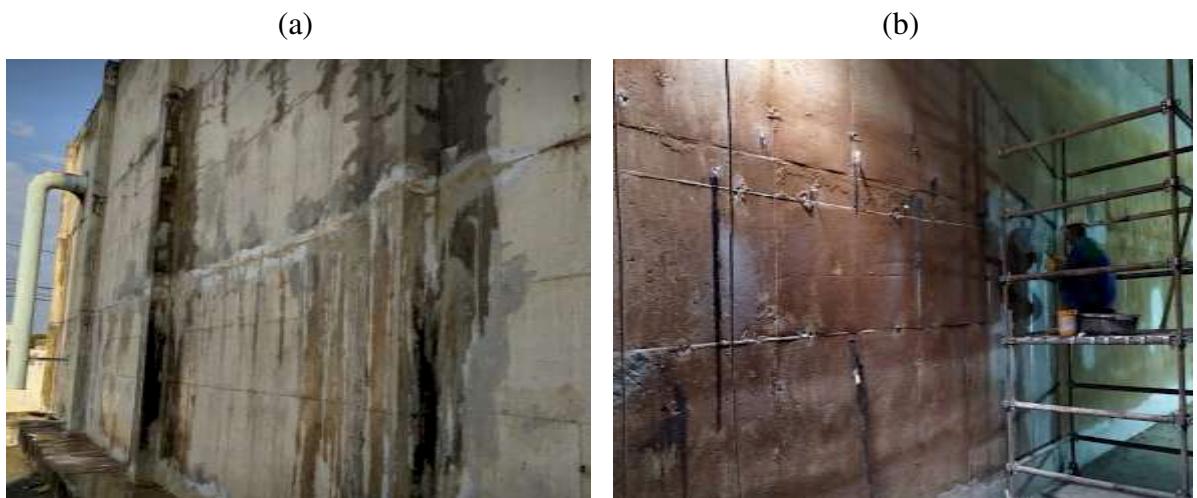
Ao analisar o ângulo médio de penetração de água, observa-se que a inserção do tensor na estrutura tende a dispersar a água em seu interior e que esta dispersão ocorre relação à direção

de aplicação de pressão. Portanto, as dimensões dos elementos de vedação devem ser planejadas levando-se em consideração esta situação.

#### 4.8 COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS EM RELAÇÃO À OBRAS EXECUTADAS

O estudo possibilitou a comparação entre os resultados do experimento e a ocorrência de infiltração em alguns reservatórios de concreto de distribuição de água. Observa-se na Figura 50, um reservatório apoiado na cidade de Uberlândia-MG, com capacidade de  $5 \times 10^6$  litros, executado em concreto com especificações similares às do experimento, com vazamentos externos e internos em suas paredes laterais de 30 cm de espessura. Vários vazamentos foram observados na região de instalações de tensores com barra chata e vedação com neoprene, no primeiro mês de operação desta estrutura. Estes vazamentos foram mais intensos em regiões próximas ao fundo dos reservatórios, com pressões máximas de operação de 8 m.c.a.

Figura 50 - Vazamentos em reservatório de concreto apoiado: (a) parede externa; (b) parede interna



Fonte: O autor.

Os dados experimentais do tensor de barra chata revelam que houve infiltração de 6,60 cm para uma pressão de 10 m.c.a. aplicada durante 36 horas. Observou-se que a infiltração ocorreu de forma mais lenta na estrutura, possivelmente devido às pressões menores de operação em relação ao programa experimental. Salienta-se que os vazamentos ocorreram antes da operação do reservatório com sua pressão máxima de serviço.

Na mesma cidade ocorreram vazamentos internos e externos em um reservatório semienterrado com capacidade de  $1 \times 10^7$  litros com espessura de 35 cm, no terceiro mês após o início de sua operação. Neste reservatório foram utilizados tensores de barra roscada e concreto com especificações similares ao utilizado no experimento deste trabalho. Os pontos onde ocorreram as infiltrações possuem pressões máximas de operação de 7,5 m.c.a, abaixo dos valores de pressão aplicados no ensaio, contudo sujeitos a um tempo de aplicação de pressão bem superior. A ocorrência de infiltrações pode ser observada na Figura 51.

Figura 51 - Vazamentos em reservatório de concreto semienterrado: (a) parede externa; (b) parede interna

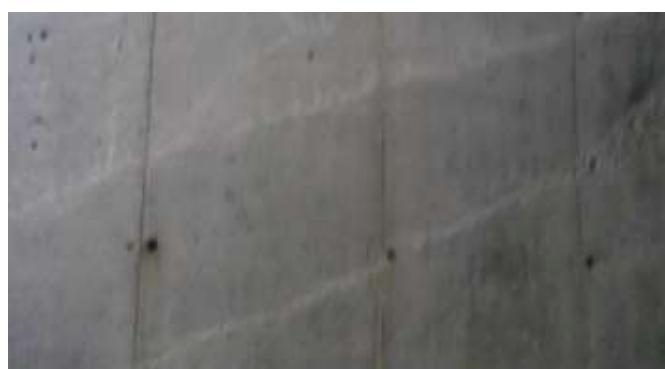


Fonte: O autor.

Os dados experimentais do tensor de barra roscada revelam que houve infiltração de 3,78 cm para uma pressão de 10 m.c.a. aplicada durante 36 horas. A ocorrência dos vazamentos em tensores nas obras analisadas segue a mesma tendência apresentada no programa experimental, principalmente com o aumento da percolação de água ao longo do tempo. A permeabilidade de água nos reservatórios durante a operação foi menor que a observada no experimento, o que possivelmente se deve ao fato da operação dos reservatórios ocorrer com enchimento gradativo, ou seja, com pressões inferiores às pressões máximas de serviço e às utilizadas no programa experimental. Observou-se que durante a execução destes reservatórios não houve implantação de projeto de impermeabilização.

O estudo do reservatório de distribuição feito por Santiago e Silva (2015) permite a observação de problemas de estanqueidade em tensores instalados próximos ao fundo da estrutura, conforme Figura 52.

Figura 52 - Vazamentos em tensores reservatório de concreto apoiado



Fonte: Santiago e Silva (2015) adaptado.

Este reservatório possui espessura de paredes de 26 cm, com pressões máximas de operação entre 9 e 10 m.c.a. A ocorrência de vazamentos nos tensores em regiões de maior pressão indica a mesma tendência do programa experimental, em que se observa aumento da infiltração da água em relação ao aumento da pressão.

A análise do programa experimental deste trabalho em comparação com os casos em que houve ocorrências de patologias em regiões dos tensores indica a necessidade de execução de sistema de impermeabilização, principalmente quando estas peças estão submetidas à altas pressões. Esta comparação também permite observar que a estimativa correta do tempo de manutenção é importante para conter a infiltração de água na estrutura, pois o tempo a qual a estrutura está submetida à pressão é preponderante nos efeitos de percolação de água em seu interior.

#### 4.9 MELHORIA DO DESEMPENHO DOS TENSORES

O desempenho do tensor é afetado por vários fatores e materiais utilizados no processo de dosagem e fabricação do concreto. Ashtibadfarid e Afrasiabi (2017) demonstram que uma relação água/cimento entre 0,35 e 0,40 é mais adequada para o concreto em contato direto com a água. No entanto, no experimento foi utilizado relação a/c = 0,50, conforme especificação dos responsáveis técnicos por projeto e execução da estrutura. Portanto, torna-se viável em futuros

testes de desempenho dos tensores, a utilização de concretos com dosagem conforme sugerido na literatura.

Em todas as situações experimentais houve percolação de água no interior da estrutura. Apesar da utilização de aditivo impermeabilizante na composição do concreto, houve infiltração de água na região de instalação dos tensores. Os dados deste experimento mostram que pode ser viável a aplicação das técnicas propostas por Guimarães et al. (2011), Reiterman e Pazderka (2016) e Cappelesso et al. (2016), que resultam na dosagem de aditivos cristalizantes em revestimentos internos de reservatórios de concreto e revestimentos hidrofóbicos na parte externa destas estruturas. Salienta-se que a moldagem do experimento não foi realizada com revestimentos cristalizantes, pois um dos objetivos de trabalho foi mensurar a capacidade de vedação dos tensores.

Os modelos experimentais mostraram que o tempo de aplicação de pressão é preponderante em relação aos efeitos de penetração de água na estrutura. Portanto, observou-se que mesmo quando a estrutura está sujeita à baixas pressões de água em suas paredes, o tempo de aplicação de pressão de água aumenta de forma significativa os efeitos de infiltração de água. Assim, o método experimental adotado pode ser utilizado para estimar prazos de manutenção na estrutura, pois este método relaciona percolação de água na estrutura no decorrer do tempo. Salienta-se que existem vários planos de manutenção estrutural baseados no tipo e na destinação do uso das estruturas. Porém o método de modelagem proposto pode fornecer dados mais exatos para estimativa do tempo de manutenção e aplicação de técnicas de reabilitação estruturais. A estimativa de tempo que a água leva para atingir a armadura e se infiltrar nas paredes de reservatórios, juntamente com os modelos de deterioração das estruturas propostos pela norma europeia EN 1504-9:2008 e por Helene et al. (2017) podem definir os prazos mais adequados para execução de manutenção preventiva em reservatórios de concreto.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta estudo do problema de percolação de água em tensores de fôrmas por meio de análise experimental. Sua principal contribuição consiste na análise experimental do comportamento de tensores sob pressão variável com o tempo em relação ao concreto de referência, sem tensor. Os modelos experimentais levam em conta fôrmas sem tensores, com tensores de barra chata e vedação com neoprene, com tensores de barra roscada e vedação com luvas fendidas. Os resultados obtidos podem ser úteis para melhoria de cada tensor, bem como na definição de métodos construtivos e planos de manutenção.

As principais conclusões deste trabalho estão descritas a seguir:

- Os tensores de barra roscada com luvas fendidas aumentam a infiltração de água em 104,01% em relação à estrutura sem tensor, na situação mais crítica do ensaio. Os tensores de barra chata com vedação de neoprene aumentam esta infiltração em 146,62% em relação à estrutura sem tensor, na situação mais crítica do ensaio. Os dados mostram que em todas as situações experimentais, a instalação de tensores de fôrmas aumenta a permeabilidade em estruturas sujeitas a pressões de água;
- Os tensores de barra chata com neoprene apresentaram desempenho inferior em relação aos tensores de barra roscada, permitindo a ocorrência de profundidades máximas de penetração de água 20,88% maiores nas situações mais críticas do ensaio;
- Observou-se passagem de água pelas laterais do neoprene e entre a junção deste com a barra chata. Entende-se que é necessário um aumento nas dimensões do neoprene, bem como uma fixação mais adequada do neoprene na barra.
- Os tensores de barra roscada com luvas fendidas apresentaram melhor desempenho em relação à vedação de passagem de água. Os resultados mostraram que as luvas fendidas permitiram passagem de água através de sua face externa, na interface entre a luva e o concreto, o que sugere que há necessidade de mudança na geometria destas peças, como por exemplo adição de flange na sua parte externa.

- Este estudo indica que o emprego de tensores na estrutura não pode ser feito sem que haja um estudo de impermeabilização. Portanto, os projetos executivos de reservatórios de água moldados *in loco* devem contemplar projetos de impermeabilização, especialmente na região de instalação dos tensores de fôrmas.
- As variáveis utilizadas pela ABNT NBR 10787:2011, norma portuguesa NP EN 12390-8:2000 e BS EN 12390-8:2000 (tempo e pressão), são significativas para descrever a penetração de água na estrutura.
- As análises estatísticas de estimativas de efeitos, juntamente com os diagramas de Pareto, mostram que a variável tempo de aplicação de pressão influencia mais na percolação de água na estrutura que a variável pressão. Portanto, o programa experimental pode ser utilizado para mensurar infiltração de água em relação ao tempo e pode fornecer dados para otimização dos planos de operação e manutenção deste tipo de estrutura.

Apesar dos tensores acarretarem maior percolação de água na estrutura, estas peças ainda são bastante utilizadas na execução de reservatórios de concreto, pois são soluções rápidas, de baixo custo e fácil execução. Contudo, devem ser utilizados com cautela, mediante elaboração de projetos de impermeabilização. O trabalho também mostrou pontos que podem ser melhorados e apresentou dados que podem ser utilizados no aperfeiçoamento e melhoria de tensores e que tais informações podem embasar a tomada de importantes decisões em obras de construção de reservatórios de concreto moldados *in loco*.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, como continuação deste trabalho, o estudo da injeção de géis acrílicos poliméricos na região de instalações dos tensores e análise do seu desempenho estrutural e de vedação, bem como a avaliação da criação de novos tipos de tensores, com diferentes áreas de seção transversal e outros elementos para vedação da passagem de água.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA JUNIOR, W.; DE PAULA, C. C.; GIOVANETTI, J. N. G.; SANTORO, C. E. M. Serviços de impermeabilização e recomposição da estanqueidade com utilização de sistemas de injeção em estruturas de concreto de usinas hidrelétricas. In: **56º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON 2014**, Natal, RN, Brasil.

ALVES, L.C.S.; FERREIRA, R.A.R.; MACHADO, L.B.; MOTTA, L.A.C. Optimization of metakaolin-based geopolymer reinforced with sisal fibers using response surface methodology. **INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS**, v. 139, p. 111551, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111551>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 201.2R-08. **Guide to durable concrete**. ACI, Farmington Hills, v. 1, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 224.1R-07. **Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structure**. ACI, Farmington Hills, v. 1, 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 224R-01. **Control of cracking of concrete structures**. ACI, Farmington Hills, v. 1, 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 315R-18. **Guide to presenting reinforcing steel design details**. ACI, Farmington Hills, v. 1, 2018.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. In: ISAIA, G. C. (ed.) **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: IBRACON, 2005 v. 2, p. 953-983.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Chloride induced reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**. V. 53, p. 1451-1464, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.025>

ASHTIBADFARID, M.; AFRASIABI, M. Low permeability concrete: water to cement ratio optimization for designing drinking water reservoir. **International Journal of Innovations in Engineering and Science**, v. 2, n. 11, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão**. NBR 10787. Rio de Janeiro, ABNT, p. 6, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 1: Requisitos gerais**. NBR 15575-1. Rio de Janeiro, ABNT, p. 71, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento**. NBR 14931. Rio de Janeiro, ABNT, p. 22, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **Execução de impermeabilização**. NBR 9574. Rio de Janeiro, ABNT, p. 14, 2008.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. Impermeabilização – seleção e projeto.** NBR 9575. Rio de Janeiro, ABNT, p. 14, 2010.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. Instalações prediais de águas pluviais.** NBR 10844. Rio de Janeiro, ABNT, p. 13, 1989.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção.** NBR 5674. Rio de Janeiro, ABNT, p. 25, 2012.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais de impermeabilização – Determinação da potabilidade da água após o contato.** NBR 12170. Rio de Janeiro, ABNT, p. 6, 2017.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.** NBR 6118 (NB 1/2014). Rio de Janeiro, ABNT, p. 178, 2014.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento.** NBR 12217. Rio de Janeiro, ABNT, p. 4, 1994.

AZEVEDO, M T. **Patologia das Estruturas de Concreto:** In: ISAIA, G. C. (ed.) *Concreto: ciência e tecnologia*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1095- 1128.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica.** São Paulo, SP. Editora Edgard Blücher LTDA, 9<sup>a</sup> edição, 2015.

BARBETTA, P. A; REIS, M. M; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática.** São Paulo. Editora Atlas, 3<sup>a</sup> edição, 2004.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos.** Campinas, SP. Editora Unicamp, 1<sup>a</sup> edição, 1996.

BHASKAR, S.; SRINIVASAN, P.; CHELLAPPAN A. Condition assessment of 30 years old overhead RCC reservoir. **National Seminar on non-destructive evaluation.** NDE, Hyderabad, India, 2006.

BRITEZ, C.; HELENE P.; BUENO, S.; PACHECO, J. Estanqueidade de lajes de subpressão. Caso MIS-RJ. In: **55º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON 2013**, Gramado, RS, Brasil.

**BRITISH STANDARD. Testing hardened concrete – Part 8. Depth of penetration of water under pressure.** BS EN 12390-8. England, p. 9, 2000.

CACCIARI, P. P.; FUTAI, M. M. Assessing the tensile strength of rocks and geological discontinuities via pull-off tests. **International journal of rock mechanics and mining sciences**, v. 105, p. 44-52, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.03.011>

CAPPELLESSO, V. G.; PETRY, N. S.; MOLIN, D. C. C. D.; MASUERO, A. B. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 9, 2016.

<https://doi.org/10.1007/s41024-016-0012-7>

CORRÊA, P. R. D.; GIRARDI, R. Análise da evolução dos parâmetros de dimensionamento de reservatórios em concreto: estudo de caso. **Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo**, v. 5, n. 1, p. 52-66. 2018.

<https://doi.org/10.18256/2358-6508.2018.v5i1.2197>

DO CARMO, P. O. **Patologia das construções. Santa Maria, Programa de atualização profissional** – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul – CREA – RS, Porto Alegre, 2003.

DOTTO, J. M. R. Corrosão induzida por íons cloreto: estudo da densidade de corrente de corrosão no aço embutido em concretos com pozolanas por meio de técnicas eletroquímicas. In: **59º Congresso Brasileiro do Concreto: O Concreto para a retomada do desenvolvimento da infraestrutura nacional**. Bento Gonçalves, RS, v. 1, 2017.

EUROPEAN STANDARD 2. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Surface protection systems for concrete**. EN 1504-2. England, p. 50, 2004.

EUROPEAN STANDARD 7. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Reinforcement corrosion protection**. EN 1504-7. England, p. 20, 2006.

EUROPEAN STANDARD 9. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. General principles for use of products and systems**. EN 1504-9. England, p. 32, 2008.

EUROPEAN STANDARD 10. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Site application of products and systems and quality control of the works**. EN 1504-10. England, p. 32, 2010.

FERREIRA, R. A. R.; MEIRELES, C. D. S.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; BARROZO, M. A. S.; SOARES, R. R. Optimization of the oxidative fast pyrolysis process of sugarcane straw by TGA and DSC analyses. **BIOMASS & BIOENERGY**, v. 134, p. 105456, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105456>

GUIMARÃES, A. T. C.; CLIMENT LLORCA, M. A. ; VERA, G. ; VICENTE, F. J. ; RODRIGUES, F. T. ; ANDRADE, C. Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure. **Construction & Building Materials**, v. 25, p. 785-790, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.005>

GUTIÉRREZ, V. C. **Guía práctica de encofrados**. Cruces-Barakaldo Bizkaia, Espanã, Ed. OSALAN, Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales, 2<sup>a</sup> edição, 2007.

HELENE, P.; ANDRADE T. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2010 v. 1, p. 905-944.

HELENE, P.; ISAIA G. C.; TUTIKIAN B. F. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. Ciência e Tecnologia, São Paulo, IBRACON, v. 2, n. 1, 2011.

HELENE, P.; MEDEIROS, M. H. F. ; ROCHA, F. C. ; MEDEIROS J. R. A. Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. **REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS**, v. 10, p. 875-885-885, 2017.  
<https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000400005>

LAMOND, J. F.; PIELERT, J. H. Significance of Tests and Properties of Concrete & Concrete-Making Materials. **Pennsylvania: American Society for Testing & Materials - ASTM**, v. 1, n.1, 2006.  
<https://doi.org/10.1520/STP169D-EB>

LIMA, M. G. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Ações do Meios Ambiente sobre as Estruturas de Concreto**. Concreto: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1. P. 733-772.

MACHADO, P.J.C.; FERREIRA, R.A.R.; MOTTA, L.A.C.; PASQUINI, D. Characterization and properties of cementitious composites with cellulose fiber, silica fume and latex. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, v. 257, p. 119602, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119602>

MATTIETTO, R. A.; MATTA, V. M. Utilização de um delineamento composto central rotacional para avaliação microbiológica de polpas de açaí pasteurizadas. In: **XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2012, Búzios, Rio de Janeiro, Brasil.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; RÉUS, G. C.; HELENE, P. Influência da altura e posição da edificação na penetração de cloretos: Estudo de caso em obra no Rio de Janeiro – Brasil. In: **VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, 2010**, Córdoba. v. 6. p. 1-13, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete – Microstructure, Properties, and Materials – 4<sup>a</sup> Ed.** Ed.: MC Graw Hill Education. ISBN.: 978-0-07-179787-0. Inglês. p.675, 2014.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control – 8<sup>a</sup> Ed.** Ed.: John Wiley & Sons. ISBN.: 978-1118146927. Inglês. P. 730, 2012.

NORMA PORTUGUESA. **Ensaios do betão endurecido. Parte 8: Profundidade de penetração de água sob pressão.** NP EN 12390-8. Portugal, p. 9, 2009.

OLIVEIRA, T. V.; NOGUEIRA, A. A.; Analysis of development of carbonation and surface wear of the concrete: a case study in ship lock 1 of the transposition system of Tucuruí dam. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 7, 2016.  
<https://doi.org/10.1007/s41024-016-0019-0>

OLIVAN, L. I.; GREGORE, L.; GARRIDO, R.; TAKI, O.; FERREIRA, T. Estruturas de concreto para abastecimento de água. Um estudo das incidências das anomalias e causas. In: **52º Congresso Brasileiro de Concreto IBRACON 2010**, Fortaleza, CE, Brasil.

PEREIRA, E. A. **Patologias em reservatórios de água potável e sua correção**. Dissertação (Mestrado), SEL - Eng. Civil, Lisboa, 2010.

PIANCHELLI, E. M.; MAGALHÃES, A. G.; SILVA, F. J.; REZENDE, M. A. P.; SANTOS, W. J.; CARRASCO, E. V. M.; MANTILLA, J. N. R. Bond strength between old and new concretes with focus on the strengthening of reinforced concrete columns – slant shear test versus double sleeve test. **Materials Science & Engineering**. v. 864, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.864.324>

RACHID, L. E. F.; LONDERO, C. Levantamento de patologias em reservatórios de concreto armado no município de Cascavel-PR. **Revista técnico-científica do CREA-PR**, v.1, n. 1, 2013.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M; MOODI F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. **Construction & Building Materials**, v. 25, p. 2742-2479, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>

REITERMAN, P.; PAZDERKA, J. Crystalline Coating and its influence on the water transport in concrete. **Advances in Civil Engineering**, v. 1, n. 1, p. 8, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/2513514>

SANTIAGO, W. C.; SILVA, D. Recuperação estrutural de grandes reservatórios de concreto: um estudo de caso. In: **57º Congresso Brasileiro de Concreto IBRACON**, 2015, Bonito, MS, Brasil.

SARAMAGO, S. F. P.; SILVA, N. P. Uma introdução ao estudo de superfícies de resposta. **Revista Horizonte científico**. v. 4, n. 4. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

SILVA, E. F.; MOREIRA, M.; R. MANZANO, M. A.; BLANCO, R. Case study of permeability-reducing admixture use in anti-flotation slabs: building in Brasilia, Brazil. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 2, p. 1, 2016 <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0014-5>

SITTER, W. R. Costs for Service Life Optimization. The “law of fives”. In: **CEB-RILEM Durability of concrete structures. Proceedings of the International Workshop held in Copenhagen**, 1984.

SOLLERO, M.; BOLORINO, H. Investigation and diagnosis of a reinforced concrete reservoir with intense crack formation from several sources. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 6, 2016.

<https://doi.org/10.1007/s41024-016-0008-3>

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** 1<sup>a</sup> ed. São Paulo, Pini, 1998.

STATSOFT, Inc. (2004). **STATISTICA (data analysis software system) version 7** [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).

TAKAGI, E. M.; OURIVES, C. N. Utilização de tecnologias de injeção para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado. **Engenharia e Construção**, Curitiba - PR, v.1, n. 112, p. 32-39, 2006.

TAVASSOLI, A. H.; AFSHAR, F. Investigating the effect of chlorine ion on corrosion of Bandar Abbas reservoir roof. **American Society for Engineering Education**, v. 6, n. 2, 2017.

TINOCO, H. F. F.; MORAIS, A. S. Diagnóstico, análise e soluções para as principais manifestações patológicas em reservatórios de concreto armado no estado do Rio Grande do Norte - Brasil. In: **53º Congresso Brasileiro de Concreto IBRACON**, 2011, Florianópolis, SC, Brasil.

YEIH, W.; CHANG, J. J. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 516–524, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.006>

ZAHID, M.; SHAFIQ, N.; ISA, M. H.; GIL, L. Statistical modeling and mix design optimization of fly ash based engineered geopolymers composite using response surface methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 483-498, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.158>

ZARZAR JÚNIOR, F. C.; SILVA, E. C. R.; MELO, M. J. A. C.; RIBEIRO, R. L. S.; Diagnosis of pathological manifestations and service life estimation of reinforced concrete structures of water reservoirs with different ages: case study. In: **XII International Conference on Durability of Building Materials and Components**. Porto, Portugal, april, 2011.

## APÊNDICE A – ENSAIO DE REFERÊNCIA, SEM TENSOR

As combinações experimentais de pressão e tempo e a identificação dos corpos de prova do ensaio do concreto de referência sem tensor, estão na Tabela A-1.

Tabela A-1 - Identificação dos corpos de prova e combinações de pressão e tempo para o concreto de referência, sem tensor (ST)

<b>Tipo de corpo de prova</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pressão (m.c.a)</b>	<b>Tempo (horas)</b>
	ST-P12-T27/1	12,93	27,51
	ST-P12-T27/2	12,93	27,51
	ST-P12-T27/3	12,93	27,51
	ST-P12-T44/1	12,93	44,48
	ST-P12-T44/2	12,93	44,48
	ST-P12-T44/3	12,93	44,48
	ST-P27-T27/1	27,07	27,51
	ST-P27-T27/2	27,07	27,51
	ST-P27-T27/3	27,07	27,51
	ST-P27-T44/1	27,07	44,48
	ST-P27-T44/2	27,07	44,48
	ST-P27-T44/3	27,07	44,48
	ST-P10-T36/1	10,00	36,00
	ST-P10-T36/2	10,00	36,00
	ST-P10-T36/3	10,00	36,00
	ST-P30-T36/1	30,00	36,00
	ST-P30-T36/2	30,00	36,00
	ST-P30-T36/3	30,00	36,00
	ST-P20-T24/1	20,00	24,00
	ST-P20-T24/2	20,00	24,00
	ST-P20-T24/3	20,00	24,00
	ST-P20-T48/1	20,00	48,00
	ST-P20-T48/2	20,00	48,00
	ST-P20-T48/3	20,00	48,00
	ST-P20-T36/1	20,00	36,00
	ST-P20-T36/2	20,00	36,00
	ST-P20-T36/3	20,00	36,00
	ST-P20-T36/4	20,00	36,00

**Corpo de prova de referência,  
sem tensor (ST)**



Fonte: O autor.

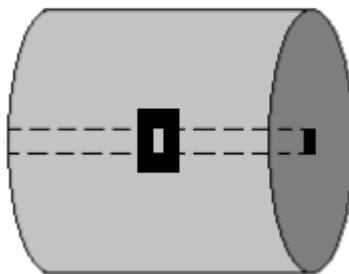
## APÊNDICE B – ENSAIO COM TENSOR DE BARRA CHATA E VEDAÇÃO COM NEOPRENE

As combinações experimentais de pressão e tempo e identificação dos corpos de prova do ensaio com tensor de barra chata e vedação com neoprene, estão na Tabela B-1.

Tabela B-1 - Identificação dos corpos de prova e combinações de pressão e tempo para o tensor de barra chata e vedação com neoprene (CV)

<b>Descrição</b>	<b>Pressão (m.c.a)</b>	<b>Tempo (horas)</b>
CV-P12-T27/1	12,93	27,51
CV-P12-T27/2	12,93	27,51
CV-P12-T27/3	12,93	27,51
CV-P12-T44/1	12,93	44,48
CV-P12-T44/2	12,93	44,48
CV-P12-T44/3	12,93	44,48
CV-P27-T27/1	27,07	27,51
CV-P27-T27/2	27,07	27,51
CV-P27-T27/3	27,07	27,51
CV-P27-T44/1	27,07	44,48
CV-P27-T44/2	27,07	44,48
CV-P27-T44/3	27,07	44,48
CV-P10-T36/1	10,00	36,00
CV-P10-T36/2	10,00	36,00
CV-P10-T36/3	10,00	36,00
CV-P30-T36/1	30,00	36,00
CV-P30-T36/2	30,00	36,00
CV-P30-T36/3	30,00	36,00
CV-P20-T24/1	20,00	24,00
CV-P20-T24/2	20,00	24,00
CV-P20-T24/3	20,00	24,00
CV-P20-T48/1	20,00	48,00
CV-P20-T48/2	20,00	48,00
CV-P20-T48/3	20,00	48,00
CV-P20-T36/1	20,00	36,00
CV-P20-T36/2	20,00	36,00
CV-P20-T36/3	20,00	36,00
CV-P20-T36/4	20,00	36,00

**Corpo de prova com tensor de barra chata, com vedação (CV)**



Fonte: O autor.

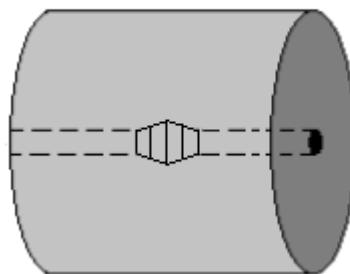
## APÊNDICE C – ENSAIO DO TENSOR DE BARRA ROSCADA E VEDAÇÃO COM LUVA FENDIDA

As combinações experimentais de pressão e tempo e identificação dos corpos de prova do ensaio com tensor de barra roscada e vedação com luvas fendidas estão na Tabela C-1.

Tabela C-1 - Identificação dos corpos de prova e combinações de pressão e tempo para o tensor de barra roscada com luvas fendidas (RV)

<b>Descrição</b>	<b>Pressão</b> (m.c.a)	<b>Tempo</b> (horas)
RV-P12-T27/1	12,93	27,51
RV-P12-T27/2	12,93	27,51
RV-P12-T27/3	12,93	27,51
RV-P12-T44/1	12,93	44,48
RV-P12-T44/2	12,93	44,48
RV-P12-T44/3	12,93	44,48
RV-P27-T27/1	27,07	27,51
RV-P27-T27/2	27,07	27,51
RV-P27-T27/3	27,07	27,51
RV-P27-T44/1	27,07	44,48
RV-P27-T44/2	27,07	44,48
RV-P27-T44/3	27,07	44,48
RV-P10-T36/1	10,00	36,00
RV-P10-T36/2	10,00	36,00
RV-P10-T36/3	10,00	36,00
RV-P30-T36/1	30,00	36,00
RV-P30-T36/2	30,00	36,00
RV-P30-T36/3	30,00	36,00
RV-P20-T24/1	20,00	24,00
RV-P20-T24/2	20,00	24,00
RV-P20-T24/3	20,00	24,00
RV-P20-T48/1	20,00	48,00
RV-P20-T48/2	20,00	48,00
RV-P20-T48/3	20,00	48,00
RV-P20-T36/1	20,00	36,00
RV-P20-T36/2	20,00	36,00
RV-P20-T36/3	20,00	36,00
RV-P20-T36/4	20,00	36,00

**Corpo de prova com tensor de barra roscada, com vedação (RV)**



Fonte: O autor.

## APÊNDICE D – ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE PRESSÃO NOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios foram realizados em quatro etapas, de acordo com a capacidade da bancada de hidrometria, conforme Tabela D-1.

Tabela D-1 - Aplicação de pressões nos corpos de prova

<b>Data e horário do experimento</b>	<b>Corpos de prova</b>
Início: 17/04/2020 – 18:00	ST-P10-T36/1, ST-P10-T36/2, ST-P10-T36/3, CV-P10-T36/1, CV-P10-T36/2, CV-P10-T36/3, ST-P20-T24/1, ST-P20-T24/2, ST-P20-T24/3, CV-20-T24/1, CV-20-T24/2, CV-20-T24/3, RV-P20-T24/1, RV-P20-T24/2, RV-P20-T24/3, ST-P20-T48/1, ST-P20-T48/2, ST-P20-T48/3, CV-P20-T48/1, CV-P20-T48/2, CV-P20-T48/3, RV-P20-T48/1, RV-P20-T48/2, RV-P20-T48/3, CV-P27-T27/1, CV-P27-T27/2, CV-P27-T27/3, CV-P27-T44/1, CV-P27-T44/2, CV-P27-T44/3.
Término: 19/04/2020 – 18:00	ST-P12-T27/1, ST-P12-T27/2, ST-P12-T27/3, ST-P12-T44/1, ST-P12-T44/2, ST-P12-T44/3, RV-P12-T27/1, RV-P12-T27/2, RV-P12-T27/3, RV-P12-T44/1, RV-P12-T44/2, RV-P12-T44/3, ST-P27-T27/1, ST-P27-T27/2, ST-P27-T27/3, ST-P27-T44/1, ST-P27-T44/2, ST-P27-T44/3, RV-P27-T27/1, RV-P27-T27/2, RV-P27-T27/3, RV-P27-T44/1, RV-P27-T44/2, RV-P27-T44/3, ST-P30-T36/1, ST-P30-T36/2, ST-P30-T36/3, CV-P30-T36/1, CV-P30-T36/2, CV-P30-T36/3.
Início: 19/04/2020 – 18:00	ST-P12-T27/1, ST-P12-T27/2, ST-P12-T27/3, ST-P12-T44/1, ST-P12-T44/2, ST-P12-T44/3, RV-P12-T27/1, RV-P12-T27/2, RV-P12-T27/3, RV-P12-T44/1, RV-P12-T44/2, RV-P12-T44/3, ST-P27-T27/1, ST-P27-T27/2, ST-P27-T27/3, ST-P27-T44/1, ST-P27-T44/2, ST-P27-T44/3, RV-P27-T27/1, RV-P27-T27/2, RV-P27-T27/3, RV-P27-T44/1, RV-P27-T44/2, RV-P27-T44/3, ST-P30-T36/1, ST-P30-T36/2, ST-P30-T36/3, CV-P30-T36/1, CV-P30-T36/2, CV-P30-T36/3.
Término: 21/04/2020 – 06:00	RV-P10-T36/1, RV-P10-T36/2, RV-P10-T36/3, ST-P20-T36/1, ST-P20-T36/2, ST-P20-T36/3, ST-P20-T36/4, CV-P20-T36/1, CV-P20-T36/2, CV-P20-T36/3, CV-P20-T36/4, RV-P20-T36/1, RV-P20-T36/2, RV-P20-T36/3, RV-P20-T36/4.
Início: 21/04/2020 – 18:00	CV-P12-T27/1, CV-P12-T27/2, CV-P12-T27/3, CV-P12-T44/1, CV-P12-T44/2, CV-P12-T44/3, RV-P30-T36/1, RV-P30-T36/2, RV-P30-T36/3, ST-P30-T48/1, ST-P30-T48/2, ST-P30-T48/3, CV-P30-T48/1, CV-P30-T48/2, CV-P30-T48/3, RV-P30-T48/1, RV-P30-T48/2, RV-P30-T48/3.
Término: 23/04/2020 – 06:00	
Início: 23/04/2020 – 18:00	
Término: 25/04/2020 – 18:00	

Fonte: O autor.

## APÊNDICE E – CORPOS DE PROVA DO EXPERIMENTO

A moldagem dos corpos de prova ocorreu em etapa única, durante concretagem de paredes de um reservatório de água na cidade de Uberlândia-MG, com o intuito de utilizar o concreto do mesmo lote em todo o experimento, de acordo com Figura E-1.

Figura E-1 - Moldagem dos corpos de prova utilizados no experimento



Fonte: O autor.

## APÊNDICE F – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA NOS ENSAIOS DO CONCRETO DE REFERÊNCIA SEM TENSOR

As máximas profundidades de penetração foram medidas por meio da repetição de ensaios, o que possibilitou a obtenção dos valores médios de infiltração da água no concreto, conforme Tabela F-1.

Tabela F-1 – Profundidades máximas de penetração de água sob pressão no concreto de referência sem tensor

<b>Pressão (m.c.a)</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Profundidades máximas de penetração (cm)</b>			<b>Profundidade média (cm)</b>
		<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	
12,93	27,51	1,60	1,52	1,39	1,50
12,93	44,48	2,52	2,34	2,49	2,45
27,07	27,51	1,98	1,72	2,01	1,90
27,07	44,48	3,17	3,21	3,22	3,20
10,00	36,00	1,84	1,78	1,81	1,81
30,00	36,00	2,73	2,81	2,92	2,82
20,00	24,00	1,66	1,71	1,80	1,72
20,00	48,00	2,97	3,09	2,87	2,98
20,00	36,00	-	-	-	1,92
20,00	36,00	-	-	-	1,98
20,00	36,00	-	-	-	1,97
20,00	36,00	-	-	-	1,91

Fonte: O autor.

## **APÊNDICE G – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA NOS ENSAIOS DO TENSOR DE BARRA CHATA E VEDAÇÃO COM NEOPRENE**

As máximas profundidades de penetração foram medidas por meio da repetição de ensaios, o que possibilitou a obtenção dos valores médios de infiltração da água no concreto com tensor de barra chata e vedação com neoprene, conforme Tabela G-1.

Tabela G-1 – Profundidades máximas de penetração de água sob pressão para o concreto com tensor de barra chata e vedação com neoprene

<b>Pressão (m.c.a)</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Profundidades máximas de penetração (cm)</b>			<b>Profundidade média (cm)</b>
		<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	
12,93	27,51	6,28	6,45	6,30	6,34
12,93	44,48	7,48	7,63	7,52	7,54
27,07	27,51	7,04	6,90	7,10	7,01
27,07	44,48	8,72	8,64	8,58	8,65
10,00	36,00	6,52	6,59	6,70	6,60
30,00	36,00	7,61	7,80	7,69	7,70
20,00	24,00	6,44	6,52	6,72	6,56
20,00	48,00	8,12	7,91	8,04	8,02
20,00	36,00	-	-	-	6,21
20,00	36,00	-	-	-	6,78
20,00	36,00	-	-	-	6,45
20,00	36,00	-	-	-	6,32

Fonte: O autor.

## **APÊNDICE H – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA NOS ENSAIOS DO TENSOR DE BARRA ROSCADA E VEDAÇÃO LUVA FENDIDA**

As máximas profundidades de penetração foram medidas por meio da repetição de ensaios, o que possibilitou a obtenção dos valores médios de infiltração da água no concreto com barra roscada e vedação com luva fendida, conforme Tabela H-1.

Tabela H-1 – Profundidades máximas de penetração de água sob pressão para o concreto com tensor de barra roscada e vedação com luva fendida

<b>Pressão (m.c.a)</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Profundidades máximas de penetração (cm)</b>			<b>Profundidade média (cm)</b>
		<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	
12,93	27,51	3,04	2,98	3,17	3,06
12,93	44,48	4,90	4,86	5,17	4,98
27,07	27,51	3,80	3,72	3,96	3,83
27,07	44,48	6,40	6,57	6,66	6,54
10,00	36,00	3,62	3,89	3,82	3,78
30,00	36,00	5,64	5,79	5,88	5,77
20,00	24,00	3,44	3,55	3,57	3,52
20,00	48,00	3,96	5,93	6,17	6,02
20,00	36,00	-	-	-	4,02
20,00	36,00	-	-	-	4,04
20,00	36,00	-	-	-	3,97
20,00	36,00	-	-	-	3,92

Fonte: O autor.

## APÊNDICE I – COEFICIENTES DE REGRESSÃO

O cálculo dos coeficientes de regressão possibilitou a obtenção das equações das superfícies de resposta para o modelo com concreto de referência sem tensor (Tabela I-1), com tensor de barra chata e vedação com neoprene (Tabela I-2) e com tensor de barra roscada e vedação com luvas fendidas (Tabela I-3).

Tabela I-1 - Coeficientes de regressão do modelo de referência, sem tensor

<b>Fatores</b>	<b>Coeficientes de regressão</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>tp</b>	<b>p</b>
Constante ( $\beta_0$ )	4,616567	0,930134	4,96333	0,002544
Pressão	-0,141025	0,040292	-3,50010	0,012825
Pressão <sup>2</sup>	0,003352	0,000726	4,61707	0,003626
Tempo	-0,154811	0,039573	-3,91206	0,007874
Tempo <sup>2</sup>	0,002570	0,000504	5,09831	0,002225
Pressão*Tempo	0,001459	0,000765	1,90648	0,105221

Fonte: O autor.

Tabela I-2 - Coeficientes de regressão do modelo de tensores de barra chata com neoprene

<b>Fatores</b>	<b>Coeficientes de regressão</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>tp</b>	<b>p</b>
Constante ( $\beta_0$ )	15,54318	2,337923	6,64829	0,000559
Pressão	-0,32418	0,101275	-3,20099	0,018577
Pressão <sup>2</sup>	0,00793	0,001825	4,34460	0,004851
Tempo	-0,43068	0,099467	-4,32989	0,004929
Tempo <sup>2</sup>	0,00648	0,001267	5,11133	0,002197
Pressão*Tempo	0,00183	0,001923	0,95316	0,377315

Fonte: O autor.

Tabela I-3 - Coeficientes de regressão para tensores de barra roscada e luvas fendidas

<b>Fatores</b>	<b>Coeficientes de regressão</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>tp</b>	<b>p</b>
Constante ( $\beta_0$ )	9,298374	2,049253	4,53744	0,003944
Pressão	-0,308771	0,088770	-3,47833	0,013169
Pressão <sup>2</sup>	0,007030	0,001600	4,39450	0,004596
Tempo	-0,294359	0,087186	-3,37624	0,014927
Tempo <sup>2</sup>	0,004845	0,001111	4,36222	0,004759
Pressão*Tempo	0,003293	0,001686	1,95307	0,098639

Fonte: O autor.

## APÊNDICE J – ENSAIO DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A validação foi analisada por meio da aplicação dos valores críticos de pressão e tempo em três corpos de prova para cada tipo de ensaio. A média das profundidades e os erros experimentais foram calculados para o concreto de referência sem tensor (Tabela J-1), tensores de barra chata e vedação com neoprene (Tabela J-2) e tensores de barra roscada e luva fendida (Tabela J-3).

Tabela J-1 - Validação do modelo para o concreto de referência, sem tensor

Validação	Pressão (m.c.a)	Tempo (h)	Profundidades máximas de penetração (cm)			Profundidade média (cm)
			Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
Valores preditos	30,00	48,00	-	-	-	3,99
Valores observados	30,00	48,00	3,51	4,12	3,83	3,83
<b>erro(%) = 4,11</b>						

Fonte: O autor.

Tabela J-2 - Validação do modelo para tensores de fôrmas com barra chata e vedação com neoprene

Validação	Pressão (m.c.a)	Tempo (h)	Profundidades máximas de penetração (cm)			Profundidade média (cm)
			Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
Valores preditos	30,00	48,00	-	-	-	9,84
Valores observados	30,00	48,00	10,08	8,72	9,35	9,38
<b>erro (%) = 4,67</b>						

Fonte: O autor.

Tabela J-3 - Validação do modelo para tensores de fôrmas com barra roscada e vedação com luva fendida

Validação	Pressão (m.c.a)	Tempo (h)	Profundidades máximas de penetração (cm)			Profundidade média (cm)
			Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
Valores preditos	30,00	48,00	-	-	-	8,14
Valores observados	30,00	48,00	7,57	6,28	9,36	7,74
<b>erro (%) = 4,91</b>						

Fonte: O autor.

## ANEXO A – DOSAGEM DO CONCRETO DE REFERÊNCIA



**BRASMIX**

ENGENHARIA DE CONCRETO S/A

Uberlândia, 03 de dezembro de 2019.

À

**BT Construções**

At.: Engº Guilherme Marques

Atendendo a solicitação de V.S.<sup>a</sup>, apresentamos o traço de concreto a ser fornecido na referida obra:

Fck 35,0 MPa	Britas: 1
Lançamento: Bombeado	Slump: 120+-20 mm
Consumo Mínimo: 350 kgs	A/C: 0,50
Classe de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118): N.E * *N.E.: Não Especificado.	

Materiais	M.C.C. (Kg/m <sup>3</sup> )	Fornecedor
Cimento	389	CP III 40 RS – Holcim
Areia Fina	323	Solo Novo
Areia Grossa	484	Solo Novo
Água	196	-
Brita 1	1000	BT Construtora
Aditiv. Masterpozolit 201C	2,33 L	Basf

Bruno Galvão de Pádua Morais  
 Engenheiro Civil  
 Brasmix Engenharia de Concreto S/A  
 Departamento Técnico

## ANEXO B – ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO NO CONCRETO DE REFERÊNCIA



Relatório de ensaio nº CON/316.914/19  
Pág.:1/2

Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cogni de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-0003.  
A Cogni é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation.

### RELATÓRIO DE ENSAIO

#### CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

#### ENSAIOS DE DURABILIDADE

**INTERESSADO:** SIKI S.A.  
AVENIDA DR. ALBERTO JACKSON BYINGTON 1525 - VL.MENCK  
06278 000 - OSASCO (SP)  
Ref.: (123.388)

**1. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA**

Amostra constituída por 3 (três) corpos de prova de concreto, recebidos pela equipe técnica da L.A. Falcão Bauer e identificados conforme a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Identificação das amostras

Dimensões dos corpos de prova	Ø 150mm
Data da moldagem	25/03/2019
Série	41B

**2. MÉTODO / ESPECIFICAÇÃO**

ABNT NBR 10787:2011 - Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão.

**3. RESULTADOS OBTIDOS**

**3.1 Determinação da penetração de água sob pressão**

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de penetração de água sob pressão realizados conforme ABNT NBR 10787:2011. O Gráfico 1 exibe a altura máxima alcançada pela água penetrada no corpo de prova e a Figura 1 expõe fotos durante o ensaio.

Tabela 2 - Determinação da penetração de água sob pressão

Corpo de prova nº	Pressão (MPa)	Data	Horário	Penetração externa média (mm)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Penetração interna h máxima (mm)	Média de penetração (mm)
01	0.1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	10	13
	0.3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0.7	16/05/2019	08:00	Não Houve				
02	0.1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	15	13
	0.3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0.7	16/05/2019	08:00	Não Houve				
03	0.1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	15	13
	0.3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0.7	16/05/2019	08:00	Não Houve				

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e, sua utilização para fins promocionais dependerá de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquino, 111 - SP - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833  
SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos + RJ: Macaé - Rio de Janeiro + MG: Belo Horizonte  
[www.falcobauer.com.br](http://www.falcobauer.com.br) - [falcobauer@falcobauer.com.br](mailto:falcobauer@falcobauer.com.br)



**Falcão Bauer**  
Centro Técnico de Controle de Qualidade

Relatório de ensaio nº CON/316.914/19  
Pág.:22

Laboratório de Ensaio Acreditado pela Cgpre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-0003.  
A Cgpre é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC – International Laboratory Accreditation Cooperation.

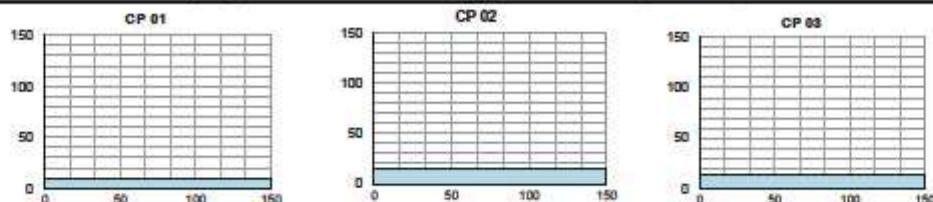


Gráfico 1 - Distribuição Interna da penetração de água



Figura 1 - Ensaio de penetração de água sob pressão

#### 4. DATAS DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1 Ensaio realizados no período de 13/05/2019 a 16/05/2019;

#### 5. OBSERVAÇÕES:

- 5.1 Os resultados obtidos referem-se somente ao material submetido ao ensaio;  
 5.2 Não é de responsabilidade da L.A. Falcão Bauer qualquer referência a exatidão da amostragem, a menos que esta tenha sido efetuada mediante a supervisão da mesma;  
 5.3 É de responsabilidade do interessado as informações constantes da amostra, não cabendo o questionamento posterior por falta e imprecisão das informações.

São Paulo, 24 de maio de 2019.

**L.A. FALCÃO BAUER LTDA**  
Centro Tecnológico de Controle de Qualidade

**ARTHUR SPINOLA PATRON ALVES**  
Técnico de Edificações  
CREA nº 5069780747

BPIW

**L.A. FALCÃO BAUER LTDA**  
Centro Tecnológico de Controle de Qualidade

**ENGº LUIS ALBERTO BORIN**  
Gerente Controle Tecnológico/Lab. Concreto/ Ensaio em Obras  
CREA Nº 0685022620

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e, sua utilização para fins promocionais dependerá de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquilino, 111 - SP - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833  
SP: Bauru • Campinas • Santos • São José dos Campos • RJ: Macaé • Rio de Janeiro • MG: Belo Horizonte  
[www.falcobauer.com.br](http://www.falcobauer.com.br) - [bauer@falcobauer.com.br](mailto:bauer@falcobauer.com.br)



Relatório de ensaio nº CON/316.916/19  
Pág.:1/2

Laboratório de Ensaio Acreditado pelo Cogni de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-0003.  
A Cogni é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation.

## RELATÓRIO DE ENSAIO

### CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

#### ENSAIOS DE DURABILIDADE

##### INTERESSADO: SIKA S.A.

AVENIDA DR. ALBERTO JACKSON BYINGTON 1525 - VLMENCK  
06278 000 - OSASCO (SP)  
Ref.: (123.388)

##### 1. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Amostra constituída por 3 (três) corpos de prova de concreto, recebidos pela equipe técnica da L.A. Falcão Bauer e identificados conforme a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Identificação das amostras

Dimensões dos corpos de prova:	Ø 150mm
Data da moldagem:	25/03/2019
Série:	43B

##### 2. MÉTODO / ESPECIFICAÇÃO

ABNT NBR 10787:2011 - Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão.

##### 3. RESULTADOS OBTIDOS

###### 3.1 Determinação da penetração de água sob pressão

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de penetração de água sob pressão realizados conforme ABNT NBR 10787:2011. O Gráfico 1 exibe a altura máxima alcançada pela água penetrada no corpo de prova e a Figura 1 expõe fotos durante o ensaio.

Tabela 2 - Determinação da penetração de água sob pressão

Corpo de prova nº	Pressão (MPa)	Data	Horário	Penetração externa média (mm)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Penetração interna h máximo (mm)	Média de penetração (mm)
01	0,1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	5	10
	0,3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0,7	16/05/2019	08:00	Não Houve				
02	0,1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	10	10
	0,3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0,7	16/05/2019	08:00	Não Houve				
03	0,1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	15	15
	0,3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0,7	16/05/2019	08:00	Não Houve				

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na integral e, sua utilização para fins promocionais dependerá de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquilino, 111 - SP - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833  
SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos - RJ: Macaé - Rio de Janeiro - MG: Belo Horizonte  
[www.falcobauer.com.br](http://www.falcobauer.com.br) - [falcobauer@falcobauer.com.br](mailto:falcobauer@falcobauer.com.br)



Relatório de ensaio nº CON/316.916/19  
Pág. 2/2

Laboratório de Ensaios Acreditado pela Cogni de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-0003.  
A Cogni é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation.

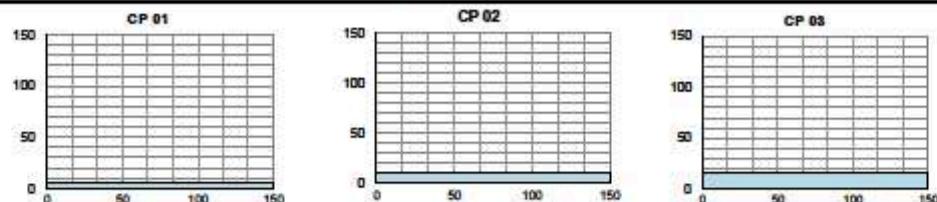


Gráfico 1 - Distribuição Interna da penetração de água



Figura 1 - Ensaio de penetração de água sob pressão

#### 4. DATAS DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1 Ensaio realizados no período de 13/05/2019 a 16/05/2019;

#### 5. OBSERVAÇÕES:

- 5.1 Os resultados obtidos referem-se somente ao material submetido ao ensaio;
- 5.2 Não é de responsabilidade da L.A. Falcão Bauer qualquer referência a exatidão da amostragem, a menos que esta tenha sido efetuada mediante a supervisão da mesma;
- 5.3 É de responsabilidade do interessado as informações constantes da amostra, não cabendo o questionamento posterior por falta e imprecisão das informações.

São Paulo, 24 de maio de 2019.

L.A. FALCÃO BAUER LTDA  
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

ARTHUR SPINOLA PATRON ALVES  
Técnico de Edificações  
CREA nº 5069780747

BSPW

L.A. FALCÃO BAUER LTDA  
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

ENGº LUIS ALBERTO BORIN  
Gerente Centro Tecnológico/Lab. Concreto/ Ensaios em Obras  
CREA Nº 0685022620

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na integral ou, a sua utilização para fins promocionais dependerá de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquilino, 111 - SP - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833  
SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos - RJ: Macaé - Rio de Janeiro - MG: Belo Horizonte  
www.falcobauer.com.br - bauer@falcobauer.com.br



**Falcão Bauer**  
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

Relatório de ensaio nº CON/16.515/19  
Pág.:1/2

Laboratório de Ensaio Acreditado pelo Cogni de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-0003.  
A Cogni é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation.

## RELATÓRIO DE ENSAIO

### CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

#### ENSAIOS DE DURABILIDADE

##### INTERESSADO: SIKA S.A.

AVENIDA DR. ALBERTO JACKSON BYINGTON 1525 - VLMENCK  
06278 000 - OSASCO (SP)  
Ref.: (123.388)

##### 1. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Amostra constituída por 3 (três) corpos de prova de concreto, recebidos pela equipe técnica da L.A. Falcão Bauer e identificados conforme a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Identificação das amostras

Dimensões dos corpos de prova:	Ø 150mm
Data da moldagem:	25/03/2019
Série:	42B

##### 2. MÉTODO / ESPECIFICAÇÃO

ABNT NBR 10787:2011 - Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão.

##### 3. RESULTADOS OBTIDOS

###### 3.1 Determinação da penetração de água sob pressão

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de penetração de água sob pressão realizados conforme ABNT NBR 10787:2011. O Gráfico 1 exibe a altura máxima alcançada pela água penetrada no corpo de prova e a Figura 1 expõe fotos durante o ensaio.

Tabela 2 - Determinação da penetração de água sob pressão

Corpo de prova nº	Pressão (MPa)	Data	Horário	Penetração externa média (mm)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Penetração interna h máximo (mm)	Média de penetração (mm)
01	0,1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	10	12
	0,3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0,7	16/05/2019	08:00	Não Houve				
02	0,1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	10	12
	0,3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0,7	16/05/2019	08:00	Não Houve				
03	0,1	13/05/2019	08:00	Não Houve	23	65	15	12
	0,3	15/05/2019	08:00	Não Houve				
	0,7	16/05/2019	08:00	Não Houve				

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na integral e, sua utilização para fins promocionais dependerá de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquilino, 111 - SP - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833  
SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos - RJ: Macaé - Rio de Janeiro - MG: Belo Horizonte  
[www.falcobauer.com.br](http://www.falcobauer.com.br) - [falcobauer@falcobauer.com.br](mailto:falcobauer@falcobauer.com.br)

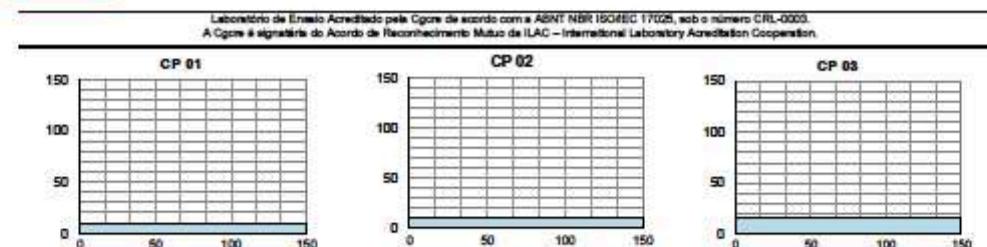


Gráfico 1 - Distribuição interna da penetração de água



Figura 1 - Ensaio de penetração de água sob pressão

## 4. DATAS DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1. Ensaio realizados no período de 13/05/2019 à 16/05/2019;

## 5. OBSERVAÇÕES:

- 5.1. Os resultados obtidos referem-se somente ao material submetido ao ensaio;
- 5.2. Não é de responsabilidade da L.A. Falcão Bauer qualquer referência a exatidão da amostragem, a menos que esta tenha sido efetuada mediante a supervisão da mesma;
- 5.3. É de responsabilidade do interessado as informações constantes da amostra, não cabendo o questionamento posterior por falta e imprecisão das informações.

São Paulo, 24 de maio de 2019.

L.A. FALCÃO BAUER LTDA  
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

ARTHUR SPINOLA PATRON ALVES  
Técnico de Edificações  
CREA nº 5069780747

BSPW

L.A. FALCÃO BAUER LTDA  
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

ENGº LUIS ALBERTO BORIN  
Gerente Controle Tecnológico/Lab. Concreto/Ensaio em Obras  
CREA Nº 0685022520

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na integral ou, a sua utilização para fins promocionais dependerá de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquilino, 111 - SP - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833  
SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos - RJ: Macaé - Rio de Janeiro - MG: Belo Horizonte  
[www.falcobauer.com.br](http://www.falcobauer.com.br) - [fbauer@falcobauer.com.br](mailto:fbauer@falcobauer.com.br)

## ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TENSOR DE BARRA CHATA E VEDAÇÃO COM NEOPRENE

**Aprumadores**

Os aprumadores permitem aprumar e alinhar as formas, bem como a armadura de aço, em altura. Graças ao seu ajuste milimétrico e à possibilidade de graduação por meio de parafusos, obtém-se uma ação de empuxo e retenção que os tornam úteis em múltiplas aplicações em obras.

**Tensor Perdido**

Disponível com entalhe a 12,5 milímetros e 25 milímetros. O tensor perdido com entalhe a 12,5 milímetros é padrão, e medidas diferentes são fabricados quando solicitadas.

12,5 mm    12,5 mm  
Espessura do muro  
Tensor com entalhe a 12,5 mm

Recobrimento de concreto desde o entalhe até a face do muro.

**Aprumadores Telescópicos**

Tamanho	Peso
<b>Ajustabilidade</b>	
PB 3000-4800 mm	25,50 Kg
PB 3600-6100 mm	32,70 Kg
PB 4500-7800 mm	45,90 Kg

**Aprumador Liso**

750-950 mm	5,00 Kg
1800-2000 mm	13,40 Kg
2800-3000 mm	16,00 Kg
3500-3700 mm	19,00 Kg
4000-4200 mm	21,00 Kg

**Acessórios**

Sapata de Fixação para Aprumador	2,70 Kg
----------------------------------	---------

**Vedaçao para Tensores (Waterstop)**

Neoprene, 6x57x22 milímetros por unidade.

**Peso**

0,50 Kg / 100 Peças

**Bainha para Tensor**

Invólucro plástico para tensor. Permite recuperar os tensores. É despachado por rolo de 75 metros lineares.

**Peso**

3,0 Kg / Role

**Andaime para Forma com Suporte para Guarda-corpo**

Proporcionam uma plataforma eficaz para fixar e/ou desformar o conjunto de formas.

Item	Peso
Andaime para Forma	7,60 Kg
Suporte para Guarda-corpo	2,95 Kg

19

**Metalf**

## ANEXO D – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TENSOR DE BARRA ROSCADA E VEDAÇÃO COM LUVA FENDIDA

### TORCISÃO Luva de vedação (Water Stop) 5/8"



A Luva de vedação (Water Stop) 5/8" Torcisaõ é fabricada em Ferro fundido nodular, sua função é vedar e suportar o fio de ferro rosca em seus pontos de transição das flamas, evitando a passagem de água entre parafusos, reduzindo assim a perda de pressão e aumentando a durabilidade.

#### Detalhes Técnicos

Atributo	Valor
Material de Fabricação	Ferro fundido nodular
Rosca	Ø5/8
Ø Externo	40,0 mm
Comprimento	80,0 mm
Peso	0,30 kg
Acabamento	Natural - Eletrozincado

