

# Avaliação probabilística do nível de segurança e durabilidade de estruturas existentes em concreto armado com base em inspeções

Naiara G. O. Porto<sup>1</sup>, João da C. Pantoja<sup>2</sup>, Hugo P. Rodrigues<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Dept. de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra  
R. Luis Reis dos Santos 290, 3030-790, Coimbra, Portugal  
naiarag.porto@gmail.com*

<sup>2</sup>*Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília  
Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC Norte, 70904-970, Brasília/DF, Brasil  
joaocpantoja@gmail.com*

<sup>3</sup>*Dept. de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro  
Campus Universitário Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal  
hrodrigues@ua.pt*

**Resumo.** O estudo de estruturas existentes é um desafio, visando fornecer técnicas de análise e cálculo que estejam próximos ao real contexto do desempenho que a estrutura e seus componentes se encontram. Este artigo aponta uma metodologia probabilística que associa uma análise de confiabilidade a um processo de inspeções e avaliações em estrutura existente de concreto armado. A investigação dos danos presentes nos elementos da estrutura acontece em fases, chegando-se a um nível de degradação para a realização de uma avaliação estrutural. Primeiramente deve ser feita uma inspeção visual com registro das condições de uso da estrutura e das patologias existentes. Para complementar os dados da inspeção, ensaios in situ ou em laboratório devem ser realizados. Através de uma metodologia, avalia-se a gravidade dos danos na estrutura e seu processo de degradação. Assim, é proposto um acoplamento dos níveis de segurança da estrutura, por confiabilidade, à um modelo de integridade de sua deterioração. A metodologia proposta, viabiliza um diagnóstico dos processos de degradação e indica o nível de segurança da estrutura e seus componentes. Logo, é possível entender o funcionamento do sistema e prever possíveis comportamentos da estrutura. Um reservatório em concreto armado será utilizado como exemplo.

**Palavras-chave:** estruturas existentes, concreto armado, durabilidade, patologias, confiabilidade.

## 1 Introdução

A avaliação de estruturas existentes é uma realidade cada vez mais presente no ramo da construção, sendo muito diferente do processo de dimensionamento de uma nova estrutura, em que existe a escolha dos materiais e do sistema estrutural de forma adequada. As alterações nas estruturas existentes estão associadas não somente as deficiências de projeto, mas sim as necessidades que se desenvolvem no decurso de seu uso. De fato, todas as estruturas irão se deteriorar ao longo do tempo, podendo apresentar modificações em seu desempenho, na aparência da estrutura e no seu funcionamento em serviço, mesmo sob condições usuais [1].

O processo de avaliação de uma estrutura existente se inicia, então, na revisão de informações a respeito da estrutura, seus componentes e sua utilização, possibilitando uma intervenção em que a reabilitação da estrutura possa garantir a sua segurança. No entanto, a dificuldade de intervenção dessas estruturas torna-se um desafio para os profissionais. Isso ocorre devido à complexidade das ações que devem ser tomadas em um ambiente já construído, com, muitas vezes, ausência de documentação e a falta de regulamentação sobre o assunto.

Nesta conjuntura, empresas e profissionais estão cada vez mais interessados em processos que possam minimizar intervenções e diminuir custos desta área, sendo fundamental a busca de novas tecnologias e soluções que visem a durabilidade e segurança da estrutura. Atualmente, existem metodologias e procedimentos que auxiliam o profissional no diagnóstico das estruturas existentes, tendo como finalidade a escolha do tipo de uma

reabilitação adequada. Porém, em função da existência de inúmeros parâmetros a serem ponderados, podendo ou não serem correlacionados, existe uma grande dificuldade no julgamento técnico da capacidade destas metodologias.

Indicado este cenário, o presente artigo propõe uma metodologia de avaliação probabilística que considere, de forma acoplada, os parâmetros de durabilidade e segurança estrutural em estruturas existentes de concreto armado. Através de inspeções e um programa de análise estrutural, a metodologia permite chegar aos níveis críticos de segurança da estrutura e seus elementos, conforme o nível de deterioração que esta apresenta. Inicialmente será utilizada a metodologia Gde/UnB proposta por Castro [2], de forma parametrizada, que possibilita o seu acoplamento aos índices de confiabilidade. Após o acoplamento, é possível realizar uma análise linear que considere a influência do processo de deterioração na estrutura, permitindo uma avaliação da diminuição do seu nível de segurança estrutural.

Um exemplo de um reservatório elevado em concreto armado é descrito e detalhado de forma a mostrar a capacidade e as limitações da metodologia. De forma geral, a metodologia proposta facilita a tomada de decisão do profissional em um processo de avaliação e reabilitação estrutural.

## **2 Avaliação de estruturas existentes**

A avaliação de estruturas existentes é um processo complexo que envolve os efeitos da deterioração na estrutura e suas consequências nos níveis de segurança e comprometimento da estabilidade estrutural. Para tal, é importante abordar a durabilidade da estrutura em relação às suas características e aos materiais que a compõe, sendo determinada pela sua interação com o ambiente. De acordo com [3], por via de regra, quase todos os mecanismos de deterioração ocorrem com decorrer do tempo.

Um modelo básico de duas etapas, fase de iniciação e fase de propagação, aplica-se ao processo de deterioração de uma estrutura. Na fase de iniciação não há sinais visíveis de deterioração nem perda significativa da resistência dos materiais ou da estrutura, porém as barreiras de proteção começam a ser danificadas pelo ambiente. Já na fase de propagação há uma evolução da deterioração, muitas vezes rápida, sendo percebida por sinais externos. Este modelo de deterioração é compatível com o modelo de Tuutti [4], aplicável a corrosão das armaduras no concreto armado.

Se tratando de um processo de reabilitação, o objetivo de uma intervenção funda-se na presença de anomalias da estrutura, na preservação da infraestrutura e no aumento da vida útil. Como o foco deste artigo é uma estrutura existente de um reservatório elevado de água, é importante perceber que o processo de reabilitação deste tipo de estrutura interfere diretamente na vida das pessoas, requerendo, além de um projeto que satisfaça os requisitos estruturais e de durabilidade, um planejamento de intervenção que consiga encontrar meios e recursos eficientes e com custos reduzidos.

A partir de atividades e procedimentos para avaliação de estruturas existentes [1], e metodologias que consigam quantificar os processos de deterioração, é possível projetar uma estrutura com uma vida útil realista. Modelos para análise de durabilidade da estrutura, com sistemas de classificação estrutural que utilizam de parâmetros e pesos nos fatores que geram a perda do desempenho da estrutura [5], [6], [7], têm sido propostos nos últimos anos. Porém, a aplicabilidade desses modelos em casos práticos ainda é deficiente.

Assim, é essencial que haja a interação entre o estudo dos fenômenos de degradação e avaliação da resistência estrutural em uma formulação simplificada. Atentando-se a esta realidade, foi escolhida a metodologia Gde/UnB [2], com as modificações apresentadas a seguir, para a avaliação do grau de deterioração e de integridade dos elementos estruturais de uma estrutura existente. Tem-se como vantagem desta abordagem, a simplicidade e a possibilidade de acoplamento a softwares estruturais após algumas alterações.

## **3 Metodologia Gde/UnB parametrizada**

Para auxiliar no estudo de estruturas existentes e na manutenção de estruturas de concreto armado, a metodologia Gde/UnB, parametrizada, foi escolhida. O seu objetivo é avaliar, quantitativamente, o grau de deterioração de elementos isolados e da estrutura como um todo, fundamentando-se em parâmetros que considerem as manifestações de danos mais frequentes, sua evolução e a influência do meio ambiente em que se encontra a estrutura.

De acordo com [8], para fazer a adequação das variáveis existentes, é preciso realizar um processo de parametrização no qual seja possível adotar diferentes escalas juntamente com outros tipos de avaliações. As modificações a serem feitas para a avaliação do grau de deterioração serão descritas a seguir e tem como intuito chegar à integridade dos elementos estruturais. Ressalta-se que as escalas de valores propostos pelo trabalho original são mantidas, uma vez que representam a contribuição dos autores sobre os fenômenos atuantes no processo de deterioração da estrutura. A Tabela 1 apresenta os valores dos fatores da metodologia Gde/Unb parametrizados. Estes serão os valores utilizados na aplicação em um exemplo, item 5.

Tabela 1. Parametrização dos fatores da metodologia Gde/UnB

Fator de Ponderação (Fp)				Fator de Intensidade	
Tipo de degradação	Pilar	Parede	Laje	Gravidade	Fi
Lixiviação	0,5	0,7	0,7	Sem lesões	0
Esfliação	0,8	1	1	Lesões leves	0,25
Desagregação	0,7	0,7	0,7	Lesões toleráveis	0,5
Cobrimto Deficiente	0,6	0,7	0,7	lesões graves	0,75
Manchas de Corrosão	0,7	0,9	0,9	Lesões intoleráveis	1
Fissuras	1	1	1		
Carbonatação	0,7	0,7	0,7		
Vazamento	1	1	1		
Impermeabilização Danificada	0,8	0,8	0,8		

Fator de Relevância Estrutural			
Tipo de Classe	$F_R$	Tipo de Família	$F_R$
Pilares	0,33	Nível 1	0,143
Laje inferior do reservatório	0,27	Nível 2	0,143
Paredes	0,2	Nível 3	0,143
Lajes	0,13	...	...
Tampa do reservatório	0,07	Nível 7	0,143

$\sum F_{Ri} = 1$

Para transformação do grau de dano (D) em fatores de integridade e para conectar a metodologia aos valores dos índices de confiabilidade nas estruturas existentes, é necessária uma parametrização no modelo de Tuutti [4], de acordo com as Figuras 1 e 2.

Assim temos,

$$Integr = [1 - D(F_i, F_p)] \tag{1}$$

Essa transformação é necessária para ser utilizada como ponderadora da resistência junto a matriz de rigidez dos elementos. Para consideração dos fatores de integridade de cada elemento de uma mesma classe, considera-se uma média direta de todos os danos presentes no elemento, diferentemente da versão original. Sendo assim, apenas valores de  $D(F_i, F_p)$  maiores que 0,2 serão contabilizados. Isso visa evitar disfarçar valores superiores na presença de outros menores. Para uma classe/família de elementos deve-se também determinar uma média dos valores. Finalmente, para os valores de integridade da estrutura completa, deverão ser definidos pesos para as classes e famílias, de acordo com sua importância estrutural.

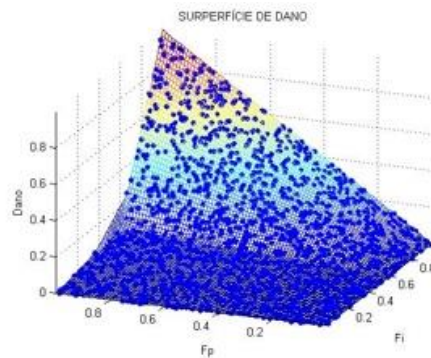
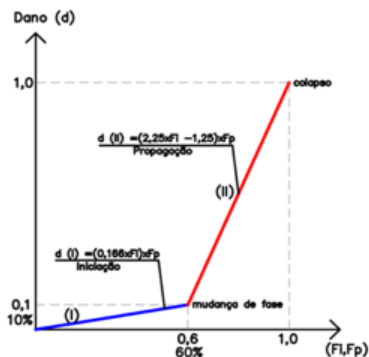


Figura 1. Modelo de Tuutti parametrizado [4]      Figura 2. Superfície de dano com base no modelo de Tuutti

## 4 Avaliação do nível de segurança via confiabilidade

O acoplamento do nível de segurança é feito de forma simples, seguindo a conjectura de que a variação do índice de confiabilidade dos elementos, classes, famílias e da estrutura segue a mesma ordem de comportamento que o fator de integridade.

$$\beta \approx \text{Integridade}(F_i, F_p) \cdot \varphi \quad (2)$$

Os valores mínimo e máximo de  $\varphi$ , que representa o nível de confiabilidade dos elementos, seguem os valores de referência para estruturas existentes, presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Índices de confiabilidade de referência [1]

Classe de consequência	Período Mínimo de referência para estruturas existentes	$\beta$ Nova		$\beta$ Reparada		$\beta$ Existente	
		WN	WD	WN	WD	WN	WD
CCO	1 ano	3.3	2.3	2.8	1.8	1.8	0.8
CC1 - Baixa	15 anos	3.3	2.3	2.8	1.8	1.8	1.1
CC2 - Média	15 anos	3.8	2.8	3.3	2.5	2.5	2.5
CC3 - Alta	15 anos	4.3	3.3	3.8	3.3	2.5	3.3

Classes de 0 a 1 (CCO e CC1) - apliadas apenas em situações onde não houver dano humano envolvido  
 WN - Forças devido ao vento não são dominantes  
 WD - Forças devido ao vento são dominantes

De forma que:

$$P(C/I) = \frac{P(C \cap I)}{P(I)} \quad (3)$$

O agrupamento do índice de confiabilidade de cada família, para a obtenção do índice de confiabilidade estrutural, segue a regra de probabilidade condicionada.

## 5 Aplicação em um exemplo

Este artigo tem como escopo a análise e aplicação da metodologia em um reservatório de água para descobrir o nível de criticidade que a estrutura se encontra e, finalmente, realizar a análise linear da estrutura. Inicialmente, portanto, foi feita a divisão da estrutura em famílias, classes e elementos, em que as famílias se subdividem nos níveis do reservatório, como mostra a Figura 3.

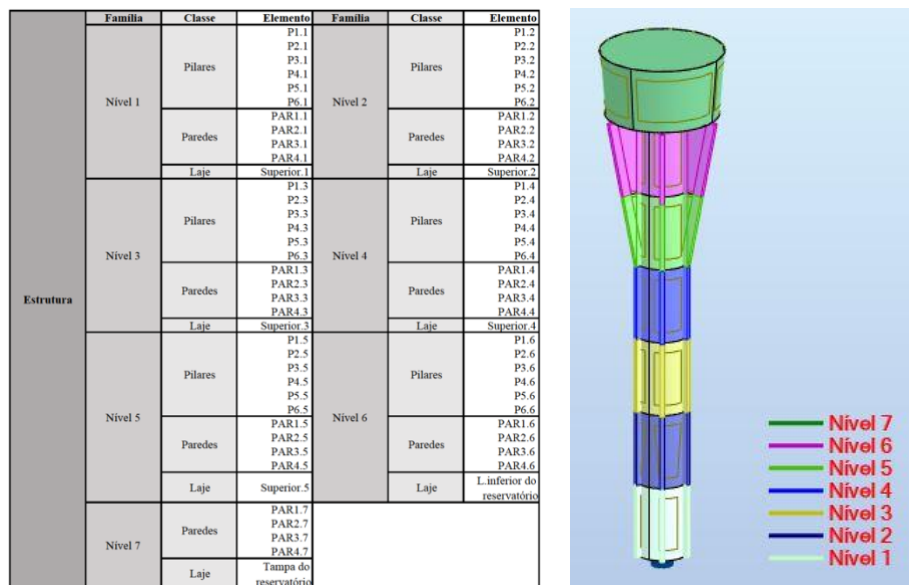


Figura 3. Divisão da estrutura e de seus níveis com modelagem feita no Robot

## 5.1 Análise linear

Foi utilizado o programa Robot Análise Estrutural como ferramenta para análise linear do reservatório apresentado, seguindo as normas do Eurocódigo 2 [9], [10].

Para a avaliação de segurança da estrutura serão utilizados os seguintes valores das ações como referência na análise linear:

- 1: Peso próprio (PP) – gerado pelo próprio programa, para concreto C16/20;
- 2: Sobrecarga (SB) – para terraços acessíveis (uniformemente distribuída de  $1,0 \text{ KN/m}^2$ );
- 3: Impulso Hidrostático (IMP) – foi considerado a água na totalidade da altura para a determinação dos esforços nas paredes e soleira ( $855,48 \text{ KN/m}^2$ );
- 4: Simulação do vento X + 20m/s;
- 5: Simulação do vento X + Y + 20m/s;
- 6: Simulação do vento Y + 20m/s;
- 7: Simulação do vento X - Y + 20m/s;
- 8: Simulação do vento X - 20m/s;
- 9: Simulação do vento X - Y - 20m/s;
- 10: Simulação do vento Y - 20m/s;
- 11: Simulação do vento X + Y - 20m/s.

A simulação do vento foi gerada automaticamente pelo programa, assim como as combinações das ações para o cálculo dos estados limites últimos e de serviço.

O fator de integridade, calculado pela parametrização da metodologia Gde/UnB, será utilizado como ponderador da resistência do concreto e do aço. Seu resultado é utilizado na matriz de rigidez da estrutura, a fim de se chegar a um comparativo da estrutura íntegra com a estrutura deteriorada. Isto significa que, na estrutura íntegra foi utilizado um concreto C16/20 – com módulo de elasticidade igual à 29GPa – e na estrutura deteriorada o módulo de elasticidade de cada elemento foi multiplicado pelo seu respectivo valor do fator de integridade, presente na Tabela 3.

Tabela 3. Fatores de integridade das classes, famílias e da estrutura

	Nível 1	Nível 2	Nível 6	Nível 7
Integr Pilares	0,66	0,66	0,68	
Integr Laje Reservatório Inferior			0,64	
Integr Paredes			0,62	0,62
Integr Tampa do Reservatório				0,64
<b>Integr das Famílias (usando fator de relevância das classes)</b>	0,66	0,66	0,65	0,63
<b>Integr da Estrutura (usando fator de relevância das famílias)</b>	0,65			

O fator de integridade pode ser acoplado, de forma direta, ao índice de confiabilidade. Com o resultado da Tabela 3, em que o fator de integridade da estrutura é igual à 0,65, temos que, uma vez que o fator de integridade varia de 0 a 1 e o índice de confiabilidade varia de 0 a 4, obtêm-se um índice de confiabilidade igual à 2,6. Dessa forma, utilizando a Tabela 2 como referência para o índice de confiabilidade, diz-se que o resultado aqui obtido representa um bom nível de segurança da estrutura.

## 5.2 Comparação da estrutura íntegra e da estrutura deteriorada

A Tabela 4 mostra um comparativo numérico dos valores dos esforços encontrados na estrutura íntegra e na deteriorada. Esses valores são referentes aos extremos globais da estrutura, obtidos diretamente pelo programa Robot.

De forma geral, a estrutura deteriorada apresenta um pequeno aumento nos valores dos esforços atuantes máximos e mínimos. Apenas a força mínima atuante em X e o momento máximo atuante em Y, apresentam um pequeno decréscimo em seus valores. Isto pode acontecer pela redistribuição de esforços que ocorre na estrutura, podendo notar-se também, pela mudança nos nós, nas barras e nos casos que apresentam as forças mínimas em Z.

Tabela 4. Extremos globais dos esforços atuantes na estrutura

Estrutura Íntegra						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kNm)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
<b>MÁX</b>	942,58	12,41	54,21	2,68	30,86	18,31
<b>Barra</b>	48	31	6	18	9	21
<b>Nó</b>	43	27	6	16	9	18
<b>Caso</b>	65 (C)	66 (C)	67 (C)	64 (C)	64 (C)	66 (C)
<b>MÍN</b>	-1978,02	-12,28	-52,35	-2,62	-27,41	-18,54
<b>Barra</b>	9	21	51	28	5	31
<b>Nó</b>	9	18	45	25	6	27
<b>Caso</b>	64 (C)	66 (C)	18 (C)	60 (C)	66 (C)	66 (C)

Estrutura Deteriorada						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kNm)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
<b>MÁX</b>	943,72	13,59	69,19	2,79	29,12	19,88
<b>Barra</b>	48	31	6	18	9	21
<b>Nó</b>	43	27	6	16	9	18
<b>Caso</b>	65 (C)	66 (C)	67 (C)	64 (C)	64 (C)	66 (C)
<b>MÍN</b>	-1929,18	-13,41	-57,72	-2,74	-34,33	-20,17
<b>Barra</b>	9	21	5	28	5	31
<b>Nó</b>	9	18	6	25	6	27
<b>Caso</b>	64 (C)	66 (C)	62 (C)	60 (C)	67 (C)	66 (C)

Para efeito de comparação e análise a seguir, será utilizado o caso de estado limite último para a combinação de ação linear:  $PP \cdot 1,35 + SB \cdot 1,50 + IM \cdot 1,50$ .

Portanto, para os esforços atuantes em relação às forças normais foram obtidos os diagramas da Figura 4, em que se nota o valor mínimo em X referente a estrutura íntegra um pouco maior do que na estrutura deteriorada, refletindo o mesmo cenário dos extremos globais. Para os momentos atuantes, nota-se que o valor máximo em y referente à estrutura íntegra é um pouco maior do que na estrutura deteriorada, refletindo novamente o cenário dos extremos globais e das forças normais.

Estes resultados refletem que a estrutura apresenta um nível de deterioração baixo, o que pode ser confirmado pelo valor do índice de confiabilidade obtido anteriormente.

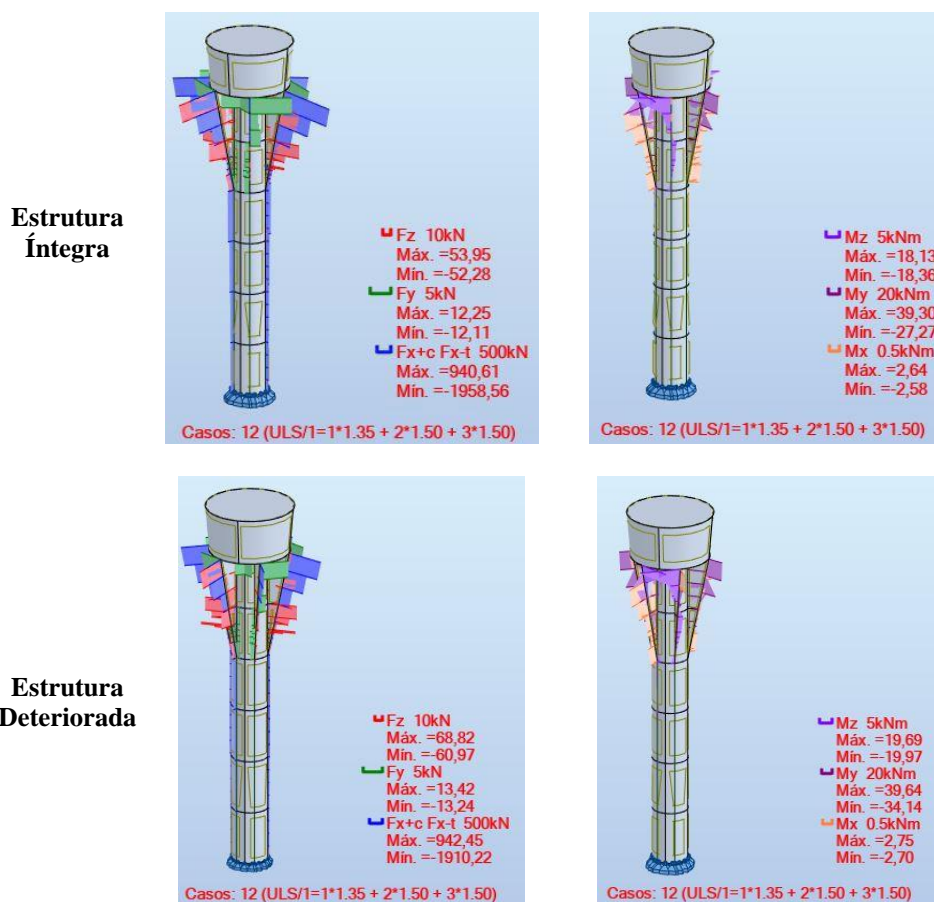


Figura 4. Diagramas de forças e momentos

Na deformação da estrutura, demonstrada na Figura 5, observa-se uma deformação similar para a estrutura íntegra e degradada, com um aumento no valor da deformação da estrutura degradada. Todos os resultados obtidos verificam um nível de criticidade baixo de deterioração na estrutura.

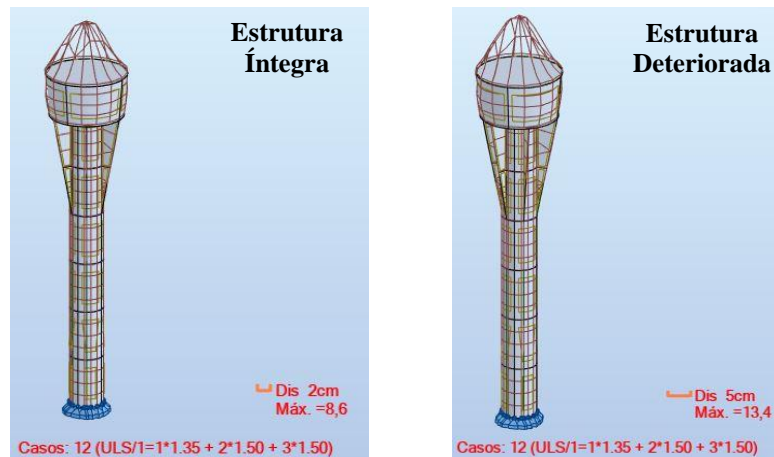


Figura 5. Mapas das deformações na estrutura

## 6 Conclusão

A metodologia proposta foi capaz de expressar resultados que demonstram, quantitativamente, o nível de criticidade que a estrutura e seus elementos apresentam. O acoplamento direto do fator de integridade ao índice de confiabilidade, traz, de forma simplificada e com mais sentido físico, a relação do nível de segurança dos elementos, classes, famílias e da estrutura global. É preciso, no entanto, olhar com atenção os valores muito baixos de danos nos elementos, pois estes podem mascarar o estado em que a estrutura se encontra.

Nota-se, pela análise linear, que a estrutura não apresentou muitas diferenças de esforços e deformações, expressando a distribuição de esforços que ocorre quando há a presença de algum dano. Esta metodologia, portanto, mostra-se mais eficiente em estruturas que apresentem patologias em estados mais graves e, conseqüentemente, que apresentem um grau de deterioração da estrutura alto. Este fator é um reflexo do modelo de Tuutti, em que a fase de iniciação do dano é muito mais demorada do que a fase de propagação.

A metodologia proposta, porém, pode auxiliar de forma rápida e eficiente o profissional que avalia a estrutura, a fim de tornar a sua tomada de decisão, no processo de reabilitação, mais realista e de acordo com os níveis de segurança e durabilidade das estruturas de concreto armado.

## Referências

- [1] *fib* Bulletin 62, *Structural Concrete – Volume 5*. Manual – Textbook on behavior, design and performance. 2<sup>nd</sup> ed. Fédération Internationale du Béton (*fib*), Lausanne, Switzerland, 476 p, 2010.
- [2] E.K. Castro. “Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado”. *Dissertação de Mestrado*, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185 p, dezembro, 1994.
- [3] *fib* Bulletin 213/214, *Model Code 90: Design code*. Final version published by Thomas Telford Ltd., London, 460 p, 1993.
- [4] K. Tuutti. “Corrosion steel in concrete”. Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm, 469 p, 1982.
- [5] *fib* Bulletin 243, *Strategies for testing and assessment of concrete structures: Guidance report*. Fédération Internationale du Béton (*fib*), Lausanne, Switzerland, 184 p, 1998.
- [6] M.Y.L. Chew; S. S. Tan; and K. H. Kang. “Building Maintainability – Review of State of the Art”. *Journal of Architectural Engineering*, 2004.
- [7] F. Flourentzou and E. Brandt and C. Wetzel. “MEDIC – A method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets”. *Energy and Buildings*, 1999.
- [8] J. Pantoja; H. Varum; A. A. Henriques. “Metodologia probabilística para avaliação de edificações com estrutura existente em betão armado”. Encontro Nacional Betão Estrutural – BE2018, LNEC, 2018.
- [9] EN 1992-1-1:2010 – “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”.
- [10] EN 1992-3:2006 – “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures”.