



Naiara Guimarães de Oliveira Porto

# AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DO NÍVEL DE SEGURANÇA E DURABILIDADE DE ESTRUTURAS EXISTENTES EM BETÃO ARMADO SUBMETIDAS A DETERIORAÇÃO COM BASE EM INSPEÇÕES

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF SAFETY LEVEL AND DURABILITY OF DAMAGED  
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON INSPECTIONS

Dissertação de Mestrado em Reabilitação de Edifícios, na área de Especialização em Reabilitação Estrutural,  
orientada pelo Professor Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues e pelo Professor Doutor João da Costa Pantoja

Coimbra, julho, 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Naiara Guimarães de Oliveira Porto

**AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DO NÍVEL DE  
SEGURANÇA E DURABILIDADE DE ESTRUTURAS  
EXISTENTES EM BETÃO ARMADO SUBMETIDAS  
A DETERIORAÇÃO COM BASE EM INSPEÇÕES**  
**PROBABILISTIC ASSESSMENT OF SAFETY LEVEL AND DURABILITY OF DAMAGED  
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON INSPECTIONS**

Dissertação de Mestrado em Reabilitação de Edifícios, na área de Especialização em Reabilitação Estrutural,  
orientada pelo Professor Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues e pelo Professor Doutor João da Costa Pantoja

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, Julho de 2018

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objeto e Objetivos .....	2
2 METODOLOGIA .....	3
2.1 Estruturas Existentes .....	3
2.2 Metodologia para avaliação da durabilidade de betão armado – Gde/UnB.....	4
2.3 Confiabilidade Estrutural .....	7
2.3.1 Índice de Confiabilidade .....	9
3 PLANO DE TRABALHO .....	12
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento

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. Enquanto no dimensionamento o profissional se preocupa com as normas para as cargas gerais, índices de segurança, estados limites últimos e de serviço, modelos estruturais, na avaliação de estruturas existentes o processo de revisão de informações a respeito da estrutura, seus componentes e da sua utilização se torna o ponto de partida para melhorar ou corrigir o seu comportamento estrutural, sendo o objetivo final a garantia da sua segurança.

Alterações em estruturas estão associadas não somente à deficiências de projeto, mas sim à necessidades que desenvolvem-se ao longo do tempo. Alterações das ações atuante, devido à uma nova utilização, modificações da geometria, correspondente a mudanças dos elementos estruturais, presença de patologias, conseqüente das variações que uma estrutura de betão armado sofre, são situações que estão relacionadas à intervenções em estruturas existentes.

A dificuldade, porém, de intervenção destas 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 documentações à respeito do seu projeto, apresentando-se, assim, a evidente falta de regulamentações sobre reforço de estruturas.

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.

É interessante, neste contexto, um método de avaliação do nível de criticidade que a estrutura e seus determinados elementos se encontram, podendo, concomitantemente, apontar a chance de falha dos mesmos. Com essas informações, fica muito mais fácil determinar soluções específicas para os diferentes níveis de problemas presentes na estrutura, adequando-se à realidades existentes, como verba disponível e prazos de entrega.

## **1.2 Objeto e Objetivos**

Este estudo propõe uma metodologias de avaliação probabilística que considere, de forma acoplada, os parâmetros de durabilidade e segurança estrutural em estruturas existentes de betão armado.

Através de inspeções, será utilizada uma metodologias para análise da estrutura, tendo como objetivo determinar o nível de sua criticidade. Juntamente com um programa de análise estrutural, utilizando um modelo probabilístico, será possível chegar aos níveis críticos de segurança da estrutura e sua durabilidade.

Algumas aplicações em edifícios existentes de betão armado serão realizadas para exemplificar e mostrar o potencial da metodologia.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Estruturas Existentes

A avaliação de estruturas existentes é um processo para entender a estrutura e seus componentes a fim de encontrar as melhores soluções estruturais e de segurança de acordo com as patologias presentes.

O profissional em uma análise estrutural precisa conhecer o comportamento da estrutura e seus elementos, tendo conhecimento das circunstâncias de falha que esta estrutura está submetida, considerando os danos presentes, como fissuras, flechas, umidade, recalque, entre muitos outros. Identificar as causas e o que está contribuindo para a deterioração da estrutura, como falhas de projeto e/ou execução, ambiente hostil ou o seu uso inadequado, são fundamentais para estimar a segurança em que a estrutura se encontra.

Portanto, a avaliação de estruturas existentes começa com a análise de diferentes dados e informações:

- Documentações existentes, como projetos estruturais, de fundação, topografia dos arredores, etc., se existente;
- Vistorias;
- Ensaios laboratoriais e/ou in loco;
- Monitoramento dos danos e da estrutura;

Com a interpretação dos dados apresentados, é possível saber o nível de criticidade dos danos da estrutura e, conseqüentemente, o nível de segurança que esta se encontra. Um plano de ações de intervenções é necessário para garantir a durabilidade e segurança da mesma.

Um modelo de atividades e procedimentos para avaliação de estruturas existentes está representado na Figura 2.1 (fib BULLETIN No. 62, Volume 5, 2010).

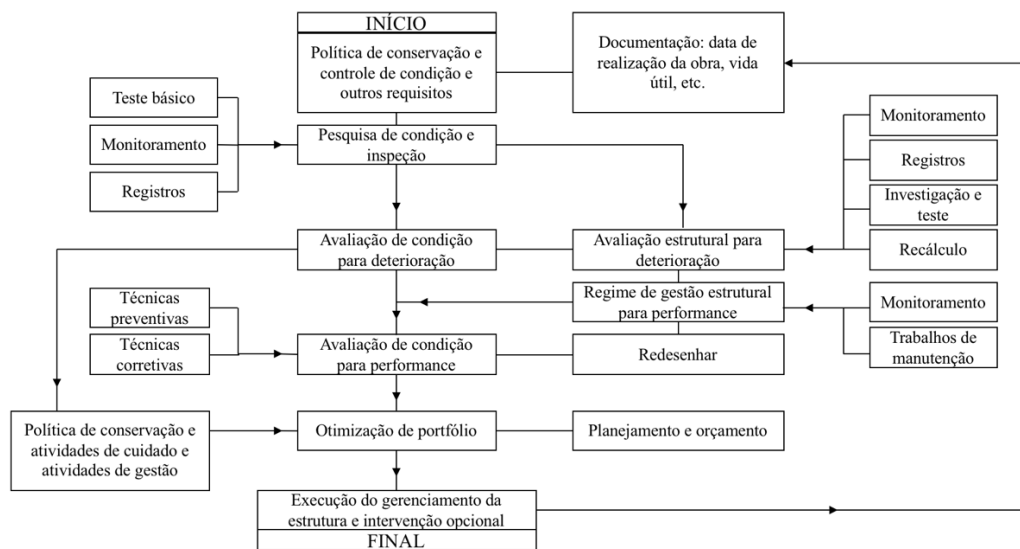


Figura 2.1 – Principais atividades envolvidas em avaliação de estruturas existentes

## 2.2 Metodologia para avaliação da durabilidade de betão armado – Gde/UnB

Para auxiliar no estudo de estruturas existentes, uma metodologia para avaliação da durabilidade de betão armado, Gde/UnB, será utilizada. O seu objetivo é avaliar, quantitativamente, o grau de deterioração destas estruturas.

Esta metodologia foi desenvolvida por Castro (1994), sendo modificada em trabalhos de mestrado por Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007).

A metodologia desenvolvida por Castro (1994), compreende-se na realização de inspeções estruturais com base no caderno de inspeções, devendo ser preenchido por um profissional com informações básicas sobre a estrutura e ao diversas matrizes que contém os dados necessários ao desenvolvimento do fluxograma.

A estrutura a ser analisada é dividida em famílias e dentro das famílias os elementos tipos. O critério adotado para a divisão das famílias é feito pelo profissional, podendo ser feito de acordo com o tipo dos componente da estrutura.

Por exemplo:

- Pilares em betão armado
- Vigas em betão armado
- Lajes em betão armado

Para cada elemento de uma família é elaborada uma matriz que reúne as suas possíveis manifestações de danos, juntamente com o Fator de Ponderação do Dano (Fp). O fator de ponderação é um valor pré-fixado que quantifica a importância relativa do dano, referente a condições de estética, funcionalidade e segurança dos elementos de uma família.

Na matriz de um elemento deve ser atribuído o Fator de Intensidade do Dano (Fi), um valor atribuído pelo profissional que classifica o nível da gravidade e evolução do dano em um determinado elemento.

Os fatores de ponderação dos danos são comuns para uma família de elementos enquanto os fatores de intensidade vão depender da situação física específica e da gravidade dos danos em cada um dos elementos da família (Castro, 1994).

Após as inspeções e levantamento de dados, determina-se para cada elemento de uma família, um Grau de Deterioração (D), correspondentes aos fatores de ponderação (Fp) e fatores de intensidade (Fi).

O Grau de Deterioração de um Elemento Estrutural Isolado (Gde) é calculado em função dos valores do grau de dano das “m” manifestações verificadas no elemento. Este resultado nos permite adotar ações de intervenção de acordo nível de criticidade que o elemento se encontra, variando desde manutenção preventiva à intervenção imediata do elemento.

Desta forma,

$$G_{de} = D_{m\acute{a}x} \cdot \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^m D_i - D_{m\acute{a}x}}{\sum_{i=1}^m D_i} \right) \quad (1)$$

O Grau de Deterioração da Família de Elementos (Gdf) é calculado de acordo com os valores obtidos dos vários elementos de uma família, a partir da expressão:

$$G_{df} = G_{de\acute{m}a\acute{x}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sum_{i=1}^m G_{de(i)} - G_{de\acute{m}a\acute{x}}}{\sum_{i=1}^m G_{de(i)}}} \quad (2)$$

Obtidos os graus de deterioração das diversas famílias de elementos que compõe a estrutura e entrando com um Fator de Relevância Estrutural da Família (Fr), previamente estabelecido



segundo a importância relativa na funcionalidade e segurança estrutural, determina-se o Grau de Deterioração da Estrutura (Gd).

O fator de relevância estrutural da família de elementos tem como objetivo considerar a importância relativa dos elementos que compõem a estrutura.

O grau de deterioração da estrutura é calculado de acordo com o valores dos graus de deterioração das “k” famílias, tendo como “peso” o fator de relevância.

O valor do grau de deterioração da estrutura é expresso pela fórmula:

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k F_r(i) \cdot G_{df}(i)}{\sum_{i=1}^k F_r(i)} \quad (3)$$

Onde,

$k$  = Número de famílias de elementos presentes na edificação;

$F_r$  = Fator de relevância de cada família;

$G_{df}$  = Grau de deterioração da família.

Este resultado nos permite adotar ações de intervenção de acordo nível de criticidade que a estrutura se encontra, variando desde manutenção preventiva à intervenção imediata do elemento.

A Figura 2.2 apresenta um fluxograma com um roteiro esquematizado de cálculo para a avaliação do grau de deterioração das estruturas de betão armado.

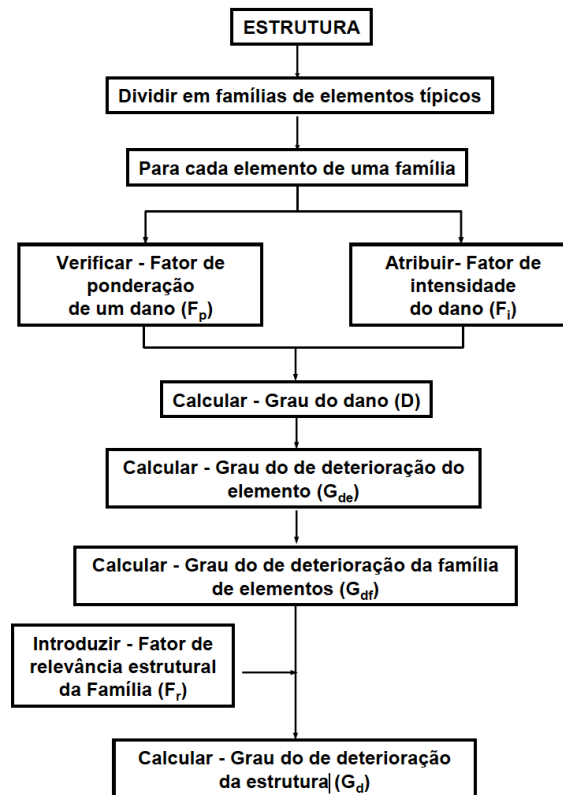


Figura 2.2 – Fluxograma

Foi feita uma inclusão, por Lopes (1998), de ensaios na metodologia, decorrente da necessidade da investigação mais minuciosa na estrutura.

Neste trabalho, será feita a parametrização da metodologia G<sub>de</sub>/Unb, com o intuito de se obter um valor probabilístico do Grau de Deterioração da Estrutura. Este valor será acoplado a um programa de análise estrutural e, assim, o profissional consegue controlar a segurança da estrutura e sua durabilidade.

### 2.3 Confiabilidade Estrutural

Na reabilitação estrutural é observado que a estrutura não desempenha satisfatoriamente todas as funções a qual foi projetada. Isto está diretamente relacionado à sua segurança estrutural, sendo que uma probabilidade de falha associa-se a um desempenho inadequado como medida de segurança.

Ao se tratar de probabilidade de falha como indicador de segurança, o problema torna-se probabilístico (Pantoja, 2012).

Neste trabalho, a confiabilidade estrutural será atribuída de acordo com o método probabilístico, em que as incertezas são atribuídas as próprias variáveis, (Santos, 2012). A segurança é, então, garantida quando a probabilidade de solicitação for menor do que a de resistência.

A confiabilidade estrutural pode ser definida como um evento complementar da probabilidade de falha, sendo representado por:

$$C = 1 - P_f \quad (4)$$

Onde:

$C$  = Confiabilidade estrutural;

$P_f$  = Probabilidade de falha.

Na confiabilidade estrutural existe um espaço generalizado das variáveis aleatórias de um problema. Uma região concentra os pontos em que todas as exigências de projeto são atendidas e outra região em que essas exigências não são, total ou parcialmente, atendidas. Isso ocorre devido às incertezas referentes às variáveis de projeto.

Para identificação das variáveis aleatórias do problema, modos de falhas são determinados, chegando-se, assim, à uma vetor  $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ .

Assim, a função de falha  $G(X)$  define-se como:

$$G(X) = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 \quad (5)$$

Quando  $G(X) > 0$  a estrutura está segura,  $G(X) \leq 0$  ocorre a falha e  $G(X) = 0$  caracteriza-se como superfície de falha.

Para que a estrutura mantenha o seu desempenho seguro, a função de falha deverá ser:

$$G(X) = R(X) - S(X) \quad (6)$$

Onde:

$R(X)$  = Resistência do elemento;  
 $S(X)$  = Solicitação imposta ao elemento.

Portando, a função utilizada para determinar a probabilidade de ocorrência da falha, será:

$$P_f = P\{G(X) \leq 0\} \quad (7)$$

A Figura 2.3 ilustra o domínio de falha para duas variáveis aleatórias.

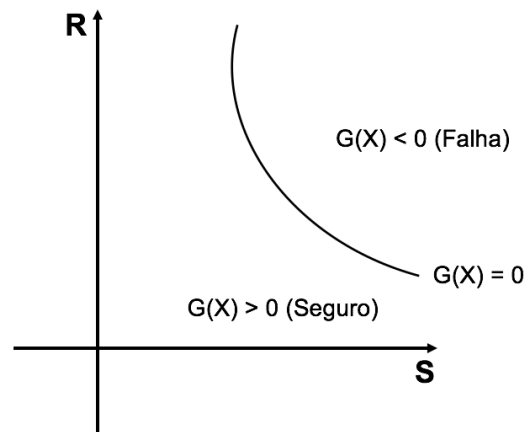


Figura 2.3 – Definição do domínio de falha

### 2.3.1 Índice de Confiabilidade

A probabilidade de falha por ser definida como o somatório da probabilidade de todos os pontos pertencentes ao domínio de falha, na forma:

$$P_f = P[R \leq S] = P\{[R - S] \leq 0\} \quad (8)$$

Sendo R e S os valores correspondentes à resistência e à solicitação de uma determinada realização.

A probabilidade de falha pode ser representada pela integral da função de falha:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^S f_{RS}(r, s) dr ds \quad (9)$$

Onde  $f_{RS}(r, s)$  é a função de densidade e probabilidade de R e S.

A Figura 2.4 ilustra a função densidade de probabilidade de margem de segurança:

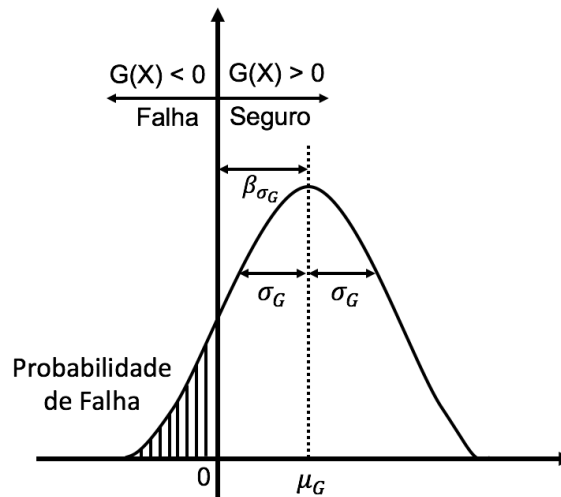


Figura 2.4 Distribuição de margem de segurança

Dessa forma, quanto maior for o coeficiente de variação das variáveis, maior será a probabilidade de falha, em que coeficientes elevados caracterizam maiores incertezas relativas às variáveis consideradas no problema.

O índice de confiabilidade é utilizado como um valor de normalização para medir o nível de confiança da estrutura.

De acordo com Moraes (2015), “[...] o índice de confiabilidade  $\beta$  é a distância entre o valor médio da variável G (aleatória) e o ponto limite do estado de falha ( $G = 0$ ) medido em unidades de desvio padrão [...]”, podendo ser representado por:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}} \quad (10)$$

Onde:

$\mu_R$  = Média da resistência;

$\mu_S$  = Média da solicitação;

$\sigma_R$  = Desvio padrão da resistência;

$\sigma_S$  = Desvio padrão da solicitação.

Valores de referência de  $\beta$  são utilizados para garantir uma probabilidade de falha, sendo estes, diferentes para estruturas novas e estruturas existentes.

A Figura 2.5 a seguir apresenta uma tabela com índices de confiabilidade de referência em estruturas existentes:

*Índices de confiabilidade de referência - fib Bulletin 62 (Volume 5)*

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) - aplicadas apenas em situações onde não houver dano humano envolvido

WN - Forças devido ao vento não são dominantes

WD - Forças devido ao vento são dominantes

Figura 2.5 – Índices de confiabilidade de referência

De acordo com Verzenhassi (2008), a partir de uma função de distribuição acumulada de variável normal padrão  $\Phi(\cdot)$ , com média nula e desvio padrão unitário, a probabilidade de falha para cada modo de falha ser:

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{11}$$

### 3 PLANO DE TRABALHO

O desenvolvimento do trabalho ocorrerá em algumas etapas. Com uma pesquisa aprofundada da metodologia citada, será possível apresentar uma base sólida para o estudo prático subsequente. No momento da análise, algumas estruturas existentes serão utilizadas, sendo estas obtidas a partir de trabalhos já realizados que contenham patologias e um estudo pertinente à aplicação da metodologia proposta. A partir dos resultados obtidos, um projeto de reabilitação de estrutura poderá ser feito, levando em consideração todo material proposto.

A Figura 3.1 apresenta o cronograma de atividades do plano de trabalho descrito:

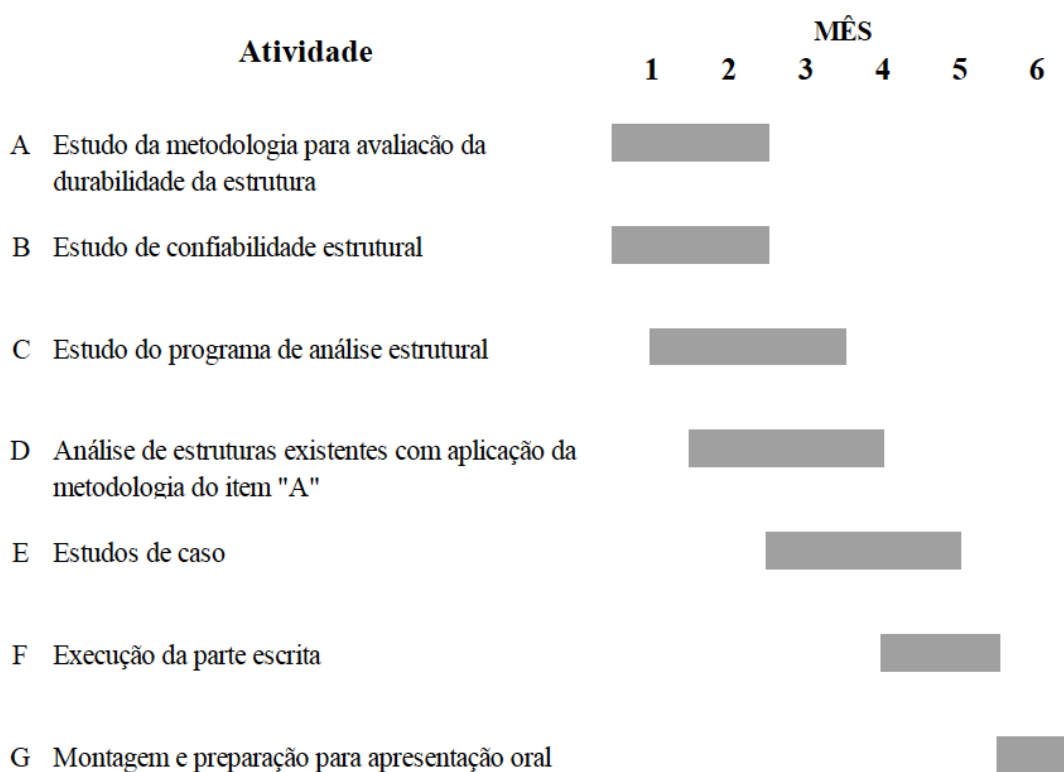


Figura 3.1 – Cronograma de atividades

---

## 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 5674 (2012). “Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção”.
- Castro, Eliane K. de (1994). “Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado”. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília.
- Fib Bulletin 62 (2010). “Structural Concrete – Textbook on behaviour, design and performance, vol. 5”.
- Fonseca, Régis P. da (2007). “A estrutura do Instituto Central de Ciências: aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenção e proposta de manutenção”. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília.
- Lopes, B. (1998). “Sistema de manutenção predial para grandes estoques de edifícios: estudo para a inclusão do componente estrutura de concreto”. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília.
- Moraes, Caline S. (2015). “Avaliação de segurança de um pilar misto via confiabilidade”. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas do Centro Universitário de Brasília, Brasília.
- Pantoja, João da C. (2012). “Geração automática via otimização topológica e avaliação de segurança de modelos de bielas e tirantes”. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Pantoja, João; Porto, Naiara & Marques, Marcos (2016). “Análise de patologias em estrutura mista com obtenção do nível de criticidade via Metodologia Gde/Unb adaptada”. Artigo, XII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Porto.
- Pereira, Hazen W. B. (2014). “Identificação das condições gerais de conservação nos reservatórios integrantes do sistema de abastecimento de água de Natal”. Dissertação de pós-graduação, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Porto, Naiara G. O. (2016). “Análise paramétrica do comportamento de elementos de membrana aplicada a estruturas de concreto armado via confiabilidade estrutural”. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas do Centro Universitário de Brasília, Brasília.
- Santos, Victor M. P. dos (2012). “Análise de confiabilidade em modelos de bielas e tirantes”. Monografia de pós graduação, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Goiás, Goiânia.



- Verzenhassi, C. C. (2008). “Otimização de risco estrutural baseada em confiabilidade”.  
Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/SP da Universidade de São  
Paulo, São Paulo.