



Vinicius Louis Dadalto Paixao

**Uma abordagem integrada para projetos de
infraestrutura em um ambiente BIM**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Elisa Dominguez Sotelino

Rio de Janeiro
Julho de 2020



Vinicius Louis Dadalto Paixao

**Uma abordagem integrada para projetos de
infraestrutura em um ambiente BIM**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Profa. Elisa Dominguez Sotelino

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Julho de 2020

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e da orientadora.

Vinicius Louis Dadalto Paixao

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), em Vitória em 2017. Entrou no programa de Pós-graduação da PUC-Rio em 2017 e desenvolveu a dissertação na linha de pesquisa BIM vinculado a sustentabilidade e degradação em estruturas de pontes.

Ficha Catalográfica

Paixão, Vinicius Louis Dadalto

Uma abordagem integrada para projetos de infraestrutura em um ambiente BIM.

Vinicius Louis Dadalto Paixao; orientadora: Elisa Dominguez Sotelino. – 2020.

89 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. BIM. 3. Degradação. 4. Pontes. 5. Mapa de processos. 6. Projeto sustentável. I. Sotelino, Elisa Dominguez. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A Deus, por ser a força maior e concessor de saúde, sabedoria e paciência para seguir sempre em frente.

Aos meus pais, Marleuza e Luiz por toda dedicação, apoio, amor e principalmente por terem me dado essa oportunidade. Pela educação impecável e por todos os momentos de apoio e orientação. Serão para sempre minhas fontes de inspiração.

Ao meu irmão, Maico, pela atenção de sempre.

A todos os meus amigos, em especial a Giselle e Monique, que esteve comigo em quase todo esse trajeto, sempre ouvindo desabafos e dando sempre o apoio necessário.

Aos meus amigos do mestrado, em especial a Catarina e Hélder, que compartilharam os melhores e piores momentos durante essa caminhada árdua, cheia de incertezas. Obrigado por tornar a caminhada mais leve.

A minha orientadora, Elisa Sotelino, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, pela compreensão e paciência durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao grupo de pesquisa RioBIM, pelo apoio nas reuniões, pelas contribuições e sugestões à minha pesquisa e pela oportunidade de estar em contato com tanta diversidade de informações toda semana.

Aos professores de graduação e pós-graduação da PUC-Rio.

Ao Geraldo Filizola, pelo tempo concedido para reuniões e principalmente por contribuir com informações que foram essenciais para a pesquisa.

A CAPES e a PUC-Rio. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Paixao, Vinicius Louis Dadalto; Sotelino, Elisa Dominguez. **Uma abordagem integrada para projetos de infraestrutura em um ambiente BIM.** Rio de Janeiro, 2020, 89p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A necessidade em alcançar projetos cada vez mais eficientes e com impactos reduzidos tem encorajado a indústria AEC (*Arquitetura, Engenharia e Construção*) a desenvolver novas metodologias para a obtenção de projetos mais eficientes, resultem em menos impactos econômicos, ambientais e sociais. É nesse contexto que a metodologia BIM vem para proporcionar ambientes mais colaborativos, dinâmicos e que obtenha como resultado um projeto mais eficiente e viável. Diante disso, o presente trabalho propõe um novo fluxo de trabalho através de um mapa de processos (IDM-Information Delivery Manual), para a elaboração de projetos de infraestrutura, especialmente pontes e viadutos, que ajude a melhorar a longevidade dessas estruturas e dessa forma também ajude a diminuir os impactos ambientais provenientes da substituição das mesmas. Para ilustrar o processo proposto no IDM, foi realizado um estudo de caso em uma ponte localizada em Porto Seguro/BA, na qual foram criados cenários, cada um com sua especificação de projeto e a partir disso foram feitas previsões no tempo em que se inicia a corrosão assim como custos associados a melhorias nas especificações de projeto. Além disso, foram mensurados os impactos decorrentes de uma interdição da ponte ocasionados pela sua degradação precoce. Dessa forma, foi possível realizar um estudo comparativo e de viabilidade para uma melhor tomada de decisões referentes às especificações de projeto consideradas, incluído dentro do mapa de processo proposto, sendo possível uma análise integrada de todas as equipes envolvidas em relação às especificações do projeto.

Palavras-chave

BIM; mapa de processos; pontes; infraestrutura; corrosão; degradação; impactos.

Abstract

Paixao, Vinicius Louis Dadalto; Sotelino, Elisa Dominguez (Advisor). **An integrated approach for infrastructure projects in a BIM environment.** Rio de Janeiro, 2020, 89p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In need to achieve increasingly efficient projects with reduced impacts has encouraged the AEC (*Architecture, Engineering and Construction*) industry to develop new methodologies for obtaining more sustainable projects, resulting in less economic, environmental and social impacts. In this context that the BIM methodology comes to provide more collaborative, dynamic environments and that results in a more efficient and viable projects. Therefore, this work proposes a new workflow through an IDM (*Information Delivery Manual*), for the elaboration of infrastructure projects, especially bridges, which guarantee longevity of the structure and thus also guaranteeing the sustainability issue. For this, a case study was carried out on a bridge located in Porto Seguro/BA in which scenarios were created, each with its project specifications and from that predictions were made in the time when corrosion starts as well as costs. In addition, the impacts resulting from an interdiction of the bridge caused by its early degradation were measured. In this way, it was possible to carry out a comparative and feasibility study for better decision making regarding the project specifications considered.

Keywords

BIM; process map; bridges; infrastructure; corrosion; degradation; sustainable project.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Motivação	13
1.2. Objetivo	15
1.3. Escopo	15
1.4. Estrutura do trabalho	16
2 Revisão estruturada da literatura	17
2.1. Método utilizado na revisão de literatura	17
2.1.1. Formulação das questões	18
2.1.2. Seleção e avaliação dos artigos	19
2.2. Revisão da literatura	21
2.2.1. Contextualização do BIM	22
2.2.2. Ciclo de vida	26
2.2.3. Durabilidade de estruturas de concreto armado	28
2.2.4. Sustentabilidade	35
3 Método de pesquisa	39
3.1. Mapa de processos	39
3.2. Método para previsão da degradação de estruturas de concreto armado	48
3.2.1. Previsão do início da corrosão	48
3.2.2. Impactos decorrentes da degradação precoce de estruturas	53
4 Estudo de caso	59
4.1. Contexto	59
4.2. Principais patologias encontradas na estrutura	61
4.2.1. Inspeção visual dos elementos estruturais	61
4.2.2. Pilares	61
4.2.3. Vigas (Longarinas e Transversinas)	62
4.2.4. Tabuleiro	64

4.2.5. Aparelhos de apoio	65
4.3. Cenários e metodologia para previsões	70
5 Resultados e Discussão dos resultados	74
6 Conclusões	80
7 Referências bibliográficas	83
Apêndice A	88

Lista de figuras

Figura 1 - Palavras chaves e subpalavras utilizadas na revisão estruturada de literatura.....	18
Figura 2 - Fluxograma para seleção dos artigos acadêmicos.....	19
Figura 3 – Lei de Sitter (Helene, 1992 apud Cavalli et al., 2008).	29
Figura 4 – Migração de agentes agressivos através do cobrimento (Adaptada de Saad et al., 2015).	31
Figura 5 – Quantidade de cloreto na superfície do concreto considerando a direção do vento (Adaptada de Gjorv, 2015).	32
Figura 6 – Etapas da deterioração das armaduras devido ao processo de corrosão. (Adaptado de Saad et al., 2015).....	33
Figura 7 – Impactos gerados no processo de obtenção de materiais da construção.	37
Figura 8 – Versão ilustrativa do IDM assim como os principais temas e grupos abordados no mesmo.	43
Figura 9 – Influência da relação água/cimento no valor do coeficiente de difusão.	50
Figura 10 - Destroços do píer construído com concreto armado com barras de aço carbono em 1973 e ao fundo o Pier Progreso construído em 1941 com concreto armado com barras de aço inoxidável (Nickel Institute, 2018).	53
Figura 11 – Faixas de rolamento da Ponte Rio da Vila.....	59
Figura 12 – Concepção estrutural da Ponte em estudo.....	60
Figura 13 – Pilar com cobrimento quase inexistente.....	62
Figura 14 - Pilar com armaduras em processo de corrosão; Deslocamento do concreto.	62
Figura 15 – Longarina com armaduras expostas em processo de corrosão avançado; cobrimento insuficiente e deslocamento do concreto.....	63
Figura 16 – Detalhe do processo corrosivo e exposição das armaduras da longarina.	63

Figura 17 – Transversinas com presença de corrosão acentuada; deslocamento do concreto; armaduras expostas e manchas escuras de umidade.	64
Figura 18 – Processo de corrosão pontual e manchas de infiltração no tabuleiro.....	64
Figura 19 – Nichos de concretagem e problemas de drenagem superficial da ponte.	65
Figura 20 – Aparelho de apoio com espessura inadequada e variável...65	
Figura 21 – Aparelho de apoio praticamente inexistente.....66	
Figura 22 – Estrutura metálica para apoio de passarela anexa a ponte. 66	
Figura 23 – Fase do IDM na qual ocorre o estudo de viabilidade para melhorias nas especificações de projeto.	68
Figura 24 – Fase do IDM na qual se deve considerar a acessibilidade para manutenções. Arquiteto deve incluir tais especificações em seu projeto.....	69
Figura 25 – Fase do IDM na qual se deve desenvolver o projeto geométrico considerando também o posicionamento mais viável da estrutura.	70
Figura 26 – Interface gráfica do aplicativo.....	73
Figura A- 1: Mapa de Processos, IDM.	Erro! Indicador não definido.

Lista de tabelas

Tabela 1 – Combinação de palavras e subpalavras utilizando operações booleanas.....	20
Tabela 2: Especificação dos filtros utilizados para a buscas nas plataformas selecionadas.....	20
Tabela 3 – Resultado da busca através da combinação de palavras e subpalavras.	20
Tabela 4 – Trabalhos utilizados na revisão de literatura da pesquisa.	21
Tabela 5 – Comparação entre o uso do CAD e BIM em um projeto de autoestradas.....	24
Tabela 6 – Valores de coeficientes de difusão em relação ao fator água/cimento.	50
Tabela 7 – Quantidade de cloreto em relação à distancia até a costa....	51
Tabela 8 – Quantidade limite de cloretos (Helene, 1993).....	52
Tabela 9 – Dados de entrada para avaliação preliminar dos impactos financeiros e ambientais.....	56
Tabela 10 – Parâmetros fixos encontrados na literatura.	56
Tabela 11 – Custos operacionais de veículos e de reconstrução de pontes em 2004 e corrigidos para 2019.	57
Tabela 12 – Dimensão dos elementos estruturais da ponte.	60
Tabela 13 – Patologias encontradas na estrutura assim como possíveis melhorias e sua respectiva fase no IDM proposto.	67
Tabela 14 – Resultados da previsão para o tempo de início da corrosão baseado nos cenários especificados.....	74
Tabela 15 – Aumento percentual dos custos relacionados às melhorias dos especificações de projeto.	75
Tabela 16 – Impactos associados a paralização da ponte em estudo.	77

Lista de abreviações

ACE – Arquitetura, Engenharia e Construção
ASEC – *American Society of Civil Engineers*
BIM – *Building Information Modelling*
BPMN – *Business Process Model and Notation*
CAD – *Computer aided design*
CPIC – *Construction Project Information Commitee*
DER – Departamento de Estradas de Rodagem
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais
IDM - *Information Delivery Manual*
IFC – *Industry Foundation Class*
LCA – *Life Cycle Assestment*
MMQ – Método dos Mínimos Quadrados
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
PIB – Produto Interno Bruto
SGO – Sistema Brasileiro de Gerenciamento de Pontes
SLR – *Structure Literature Review*
TBL – *Triple Bottom Line*
TI – Tecnologia da Informação
WCED – *World Comission on Environment and Development*

1

Introdução

1.1. Motivação

O atual contexto da indústria da construção civil, tanto em âmbito nacional como mundial, apresenta grande parcelas das obras de infraestrutura de concreto armado em processo de deterioração precoce, necessitando assim de manutenções e reparos constantes e dessa forma demandando uma grande quantidade de materiais de construção, principalmente concreto e aço. Junto a isso, interrupções no trânsito devido à necessidade de manutenções corriqueiras acarretam grandes impactos sócio-econômicos.

Segundo Helene et al. (2011) uma parcela significativa de estruturas projetadas para uma determinada vida útil apresentou-se em estado de deterioração muito mais cedo do que o previsto. Na Europa, Golfo Pérsico e, principalmente Estados Unidos, constatou-se problemas de corrosão das armaduras de pontes e viadutos em idade de 5 a 10 anos, sendo essas projetadas para uma vida útil entre 50 e 100 anos. Dessa forma, é possível notar a necessidade em mudar a forma com que se projeta e executam obras de infraestrutura, levando em consideração todo o seu ciclo de vida a fim de mitigar os grande impactos que reparos ou reconstrução de tais estruturas causam à sociedade.

O acidente ocorrido em novembro de 2018, na cidade de São Paulo, no qual um viaduto da Marginal Pinheiros cedeu, é um exemplo de como a paralização de uma obra de infraestrutura tem um impacto muito relevante tanto no local como também em outras regiões da cidade, principalmente devido à mudanças de rota. Estima-se que o reparo do viaduto custará cinco vezes mais do que a prefeitura gastou com manutenções em obras do mesmo tipo desde

2014 e que levará cerca de cinco meses para finalizar os reparos. Além do impacto econômico, existe ainda o impacto social gerado pelos transtornos devido ao trânsito intenso em todo o entorno, aumentando assim o tempo de percurso, mudanças de rotas e logo acarretando maiores gastos aos usuários. Ainda a respeito dos impactos, os impactos ambientais devido à produção de materiais para a recuperação da estrutura e também pelo aumento do tempo de utilização de veículos, devido às mudanças de rota, que ocasionam maior queima de combustíveis.

Segundo um relatório realizado pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE) estima-se que o custo de renovação e reparo de obras de infraestrutura nos Estados Unidos foi de aproximadamente quatro trilhões de dólares entre 2013 e 2019. Além disso, a ASCE considera que as obras de infraestrutura são fundamentais para a prosperidade econômica do país, impactando na produtividade dos negócios, no PIB, geração de empregos e, principalmente, competitividade internacional.

De acordo com Afonso Vitório (2005) os problemas que resultam em patologias estruturais estão intimamente ligados às diversas etapas de produção e uso do empreendimento, sendo a fase de projeto responsável por 40% das causas de patologias em estruturas de concreto armado.

Diante desse cenário, faz-se necessário uma mudança não só nos métodos, mas sim na visão e técnicas de como se projetam e executam obras, não só de edificações, mas também as obras de arte tais como pontes e viadutos, proporcionando empreendimentos mais duráveis, eficientes e sustentáveis. É nesse contexto que a indústria AEC vem cada vez mais se interessando por utilizar novas metodologias, tal como o BIM (Building Information Modeling, em português Modelagem da Informação da Construção) que propõem um novo modelo de gerenciamento no que se trata, principalmente, do fluxo de informações entre equipes (Enright & Frangopol, 1999).

Apesar da implementação do BIM estar mais consolidada para construções verticais, tais como edificações, ela é ainda pouco desenvolvida para construções horizontais, como infraestrutura. Um estudo realizado por McGraw Hill Construction (2012) mostrou que quase 70% das empresas que usaram a metodologia BIM, relataram um retorno positivo no seu investimento, deixando

claro que a utilização de tal processo deve fazer parte dos mais variados fluxos de trabalho.

A partir disso, pensar nas ações que podem aumentara vida útil das estruturas ainda nas fases iniciais do projeto, com o intuito de contornar as patologias que afluem precocemente nas estruturas, é uma tarefa que pode ser ainda mais eficiente quando inserida em um ambiente colaborativo entre todas as equipes envolvidas na concepção do projeto. Dessa forma, trazendo essa preocupação para as fases conceituais do projeto tem um grande potencial em beneficiar a vida útil de empreendimentos de infraestrutura, bem como auxiliar numa gestão mais eficiente da manutenção dos mesmos.

1.2.

Objetivo

O presente trabalho visa discutir e desenvolver um novo fluxo de trabalho, usando conceitos da metodologia BIM, para a concepção estrutural em empreendimentos de infraestrutura, a fim de conceber projetos que em sua concepção consideram o ciclo de vida do empreendimento e que, portanto, são mais sustentáveis. O principal foco da dissertação é a respeito de ações e opções que podem ser consideradas ainda em fases conceituais de projeto, que tem o potencial de proporcionar o prolongamento do tempo de vida útil das estruturas de concreto armado.

1.3.

Escopo

Para a formulação do escopo dessa pesquisa, primeiramente foi realizada uma revisão estruturada da literatura, com o intuito de contemplar uma gama representativa de artigos que envolvessem BIM, infraestrutura, degradação e sustentabilidade. Dessa forma, foram verificadas algumas lacunas do conhecimento, principalmente voltadas ao desenvolvimento do BIM na área de degradação de empreendimentos de infraestrutura. Além disso, alguns estudos ajudaram a restringir a pesquisa há algumas áreas, em especial dos tipos de degradação que ocorre em estruturas de concreto armado.

Com isso, o presente trabalho contempla o desenvolvimento de um fluxo de trabalho inserido na metodologia BIM em projetos de infraestrutura de concreto armado. A partir disso, realiza-se um estudo de aplicabilidade do fluxo de trabalho proposto na fase conceitual de projeto com o intuito de prolongar o tempo de vida útil da estrutura. O estudo é limitado à consideração da corrosão como a principal patologia das estruturas.

Um aplicativo é desenvolvido para auxiliar na tomada de decisões. A partir desse aplicativo é possível obter o tempo de início da corrosão baseado em dados palpáveis como, cobrimento, relação água/cimento e tipo de armadura utilizada. Um estudo de caso é apresentado, contemplando uma análise comparativa entre diversos cenários considerando o tempo de vida útil e custos com o intuito de demonstrar a efetividade do fluxo de trabalho proposto.

1.4.

Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto de seis capítulos. O Capítulo 1 descreve a motivação da pesquisa, os objetivos e o método da pesquisa. No Capítulo 2 é apresentada a revisão estruturada da literatura (SRL – *Structured Literature Review*), incluindo o método utilizado para sua realização, as perguntas a serem respondidas por este trabalho e a discussão de trabalhos desenvolvidos na área. O Capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho, assim como a apresentação do mapa de processos proposto para a realização de projetos de infraestrutura em fases conceituais. No capítulo 4 é apresentado um estudo de caso de uma ponte em estado de deterioração avançada. Capítulo 5 apresenta os resultados e a discussão dos resultados decorrentes das melhorias e especificações contidas em diversos cenários. Por fim, o Capítulo 6 aponta as conclusões encontradas durante todo o processo de elaboração do trabalho, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

2

Revisão estruturada da literatura

Este capítulo aborda o método utilizado na revisão estruturada da literatura. A revisão contemplou pesquisas que envolvessem a área de BIM, infraestrutura e degradação de estruturas de concreto armado, com o objetivo de verificar o grau de desenvolvimento de estudos relacionando essas áreas e dessa forma identificar lacunas do conhecimento.

2.1.

Método utilizado na revisão de literatura

O método utilizado na revisão de literatura consistiu inicialmente em selecionar as palavras chaves relevantes. Para a investigação referente a este trabalho selecionaram-se as seguintes palavras chaves: BIM, infraestrutura, degradação e sustentabilidade. Dessa forma foi feita uma pesquisa estruturada da literatura, com o intuito de obter uma maior gama de artigos que correlacionam os temas e assim determinar se existe ou não uma lacuna a ser preenchida.

Para garantir uma melhor qualidade dos resultados, utilizaram-se plataformas acadêmicas como: Engineering Village, Scopus e também o Portal Capes, filtrando apenas artigos de periódicos e de conferências. Para tal, foram utilizadas palavras chaves com várias combinações em pares dentre elas. Subpalavras também foram adicionadas obtendo assim uma gama de artigos que abordam os principais temas da pesquisa. As palavras e subpalavras foram selecionadas em português e inglês para que a pesquisa englobasse a literatura nacional e internacional.

Além da pesquisa estruturada, alguns tópicos foram pesquisados individualmente para que uma fundamentação teórica sólida fosse obtida para, o desenvolvimento da pesquisa. Em particular, os temas voltados ao processo de corrosão foram abordados separadamente.

As palavras chaves e subpalavras utilizadas estão apresentadas na Figura 1. Vale salientar que foram utilizadas palavras no idioma inglês a fim de obter estudos ao redor de todo o mundo.

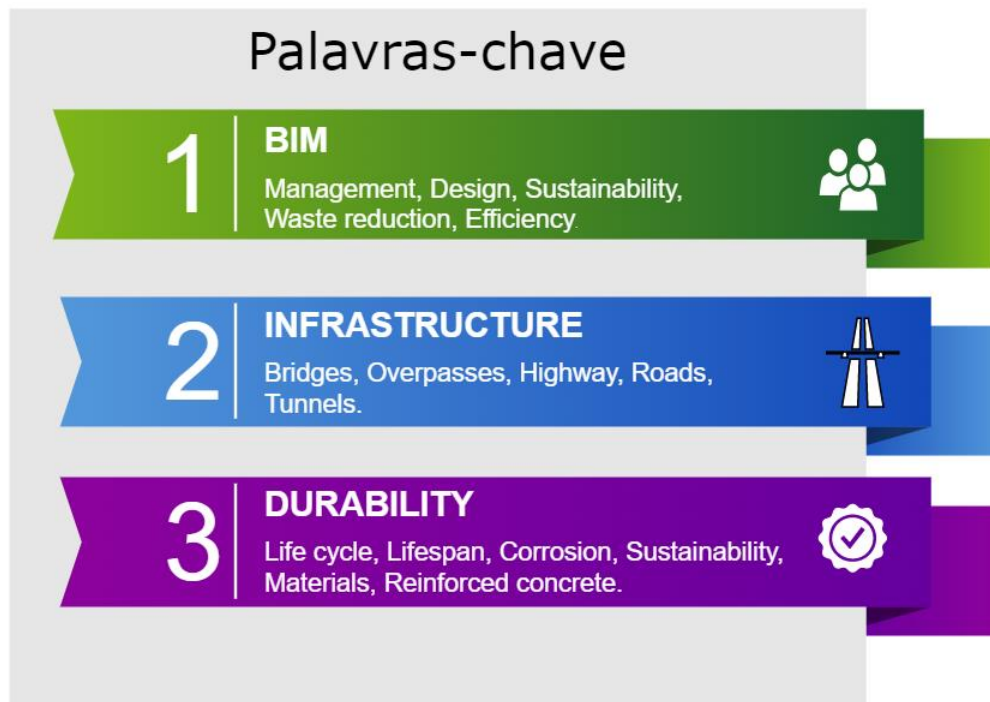


Figura 1 - Palavras chaves e subpalavras utilizadas na revisão estruturada de literatura.

2.1.1. Formulação das questões

Para a formulação das perguntas que guiaram a pesquisa, foi feito um estudo prévio de como, de fato, a metodologia BIM poderia ser implementada na concepção de projetos de obra de infraestrutura com o intuito de prolongar o tempo de vida útil de tais estruturas. Diante disso, as seguintes perguntas foram formuladas para direcionar a pesquisa.

- Como o uso da metodologia BIM pode tornar os projetos de infraestrutura mais eficientes, considerando o ciclo de vida de tais empreendimentos?
- Considerando que existe um déficit na manutenção de obras de infraestrutura, tais como pontes e viadutos, como é possível e qual a viabilidade de se prolongar a vida útil dessas estruturas, especialmente as de concreto armado?

2.1.2.

Seleção e avaliação dos artigos

Para a seleção dos artigos foram inicialmente selecionadas as palavras chaves e em seguida foram selecionadas as subpalavras. Após essa seleção, utilizou-se o banco de dados do Engineering Village, Scopus e Capes para a coleta dos artigos. A triagem foi inicialmente feita com uma análise dos títulos de cada artigo e foram eliminados os que não possuíam uma correspondência com o assunto de interesse. Após essa seleção, foram lidos os resumos, refinando ainda mais os trabalhos que possuíam relevância. Por fim os artigos selecionados foram inteiramente lidos, analisados e resumidos, destacando as informações com potencial de contribuição para a pesquisa, explicitando também possíveis lacunas a serem preenchidas com a realização do presente trabalho. A Figura 2 apresenta o fluxograma para a triagem dos artigos.

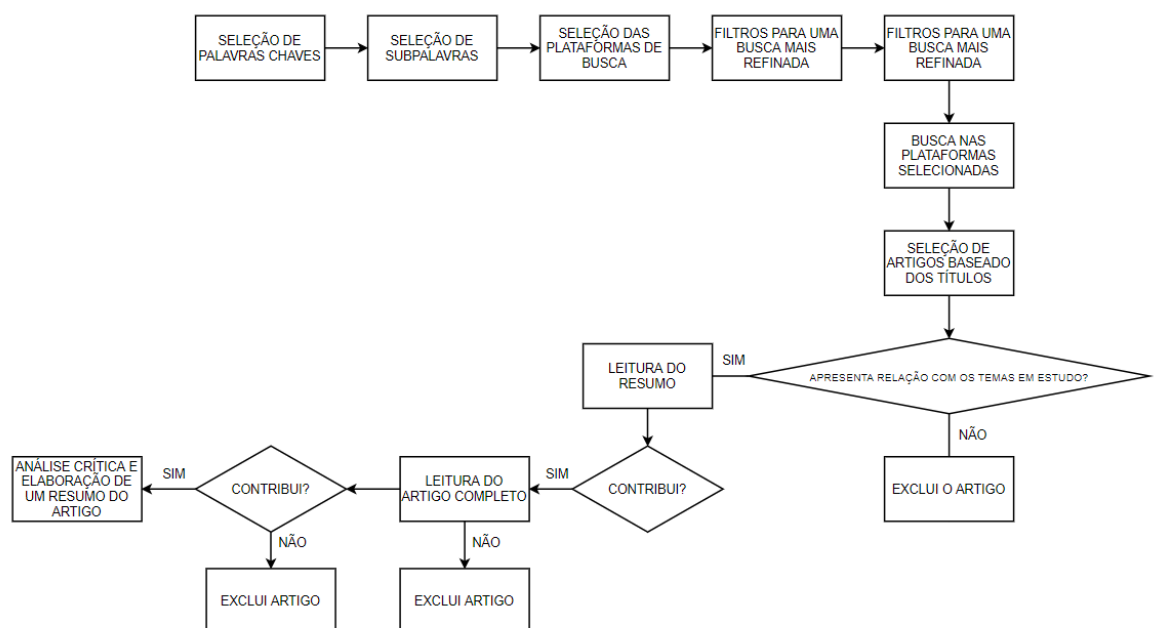


Figura 2 - Fluxograma para seleção dos artigos acadêmicos.

O artifício de buscas utilizado na busca foi com a utilização dos operadores booleanos “AND” e “OR”, com o intuito de ampliar o campo de busca. Um exemplo para a realização de uma busca utilizando a palavra-chave “BIM”, “INFRASTRUCTURE” pode ser encontrada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Combinação de palavras e subpalavras utilizando operações booleanas.

BIM + INFRASTRUCTURE	BIM AND ("management" OR "design" OR "sustainability" OR "waste reduction" OR "efficiency") AND INFRASTRUCTURE AND ("bridges" OR "overpasses" OR "highways" OR "roads" OR "tunnels")
-------------------------	---

Para ajudar a filtrar os resultados foram utilizados alguns filtros quanto ao tipo de publicação, idioma e setor da indústria. Todos os filtros utilizados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Especificação dos filtros utilizados para a buscas nas plataformas selecionadas.

Incluir	Excluir
Artigos de periódicos e conferências	Outros (artigos de conferências, etc.)
Inglês e Português	Todos os outros idiomas
Indústria AEC	Todos os outros

As classificações dos artigos encontrados em termos das palavras-chave, assim como as quantidades obtidas através da busca realizada são descritas na Tabela 3. A tabela mostra o resultado inicial, e a partir dele foi feita uma busca mais restritiva de acordo com os questionamentos que foram surgindo durante a leitura dos artigos.

Tabela 3 – Resultado da busca através da combinação de palavras e subpalavras.

	Busca	Seleção	Artigos de Conferência
BIM+INFRASTRUCUTRE	120	11	
BIM+DURABILITY	18	2	4
BIM+INFRASTRUCUTRE	20	17	
BIM+INFRASTRUCTURE+DURABILITY	1	1	3
BIM+INFRA+DURABILITY(Com as subpalavras)	0	0	2
BIM+INFRASTRUCUTRE(Com as subpalavras)	22	17	
TODAS AS PALAVRAS E SUBPALAVRAS	2	0	2

2.2.

Revisão da literatura

Esta seção apresenta os resumos dos trabalhos relevantes encontrados na revisão da literatura assim como uma análise crítica a respeito dos mesmos. Vale ressaltar que os temas abordados foram definidos baseados no desenvolvimento de buscas direcionadas e pela Revisão Estruturada da Literatura. Na Tabela 4 estão presentes os trabalhos mais relevantes utilizados na revisão da literatura.

Tabela 4 – Trabalhos utilizados na revisão de literatura da pesquisa.

Título	Autor	Ano
On the use of Building Information Modeling in infrastructure bridges.	Omar Seif	2016
Challenges and oportunities in implementing Lean and BIM on na infrastructure Project.	Dave et al.	2010
An assessment of benefits of using BIM on an infrastructure project.	Kumar et al.	2017
A comparative review of Building Information Modelling Implementation in Building and infrastructure industries.	Shou et al.	2015
BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective.	Bradley et al.	2016
MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation.	Pinheiro et al.	2018
SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and model view definition.	Sacks et al.	2018
Integrated Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis Model for concrete bridge deck applications.	Kendal et al	2008
Gestão do Ciclo de vida de Pontes (Dissertação de Mestrado).	Ricardo de Figueiredo Gonçalves Poças	2009
Bim na avaliação do Ciclo De Vida de edificações: Revisão da literatura e estudo comparativo Building Information Modelling (Bim) in Life Cycle Assesment.	Barros & Silva	2016
Influence of the covering thickness and chloride contamination in the readings of corrosion potential of steel reinforcement.	Rocha et al.	2014
Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto.	Medeiros et al.	2011
Cement and concrete research durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique.	Alexander & Beushausen	2019
Evaluation of a PSC highway bridge based on resistance capacity degradation due to a corrosive environment.	Kim et al.	2016
Arquitetura Verde: Contribuições a partir da exemplificação de tipologias vinculadas à sustentabilidade urbana.	Guerra & Lopes	2015
Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making.	Frangopol et al.	2017

Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.	Rebitzer et al.	2014
Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment.	Santos et al.	2019
O uso de ferramentas Bim na otimização do método de avaliação do ciclo de vida da edificação.	Machado & Moreira	2015
Use of BIM in the CO ₂ emission quantification process in building design: case study for the DesignBuilder software.	Borges et al.	2018
Corrosion. vol. 2, Corrosion control.	Sheir et al.	1994
Inspection of corrosion and other pathologies in metallic bridges.	Lourença et al.	2009
Determining remaining strength capacity of deteriorating RC bridge substructures.	Saad et al.	2015
Projeto da Durabilidade de Estruturas de Concreto em Ambientes de Severa Agressividade.	O.Gjorv	2017
Bridge remaining strength prediction integrated with Bayesian Network and in situ load testing.	Ma et al.	2014
Assessment of the reliability of concrete slab.	Thoft-Christensen et al.	1996
Corrosion cracking prediction updating of deteriorating RC structures using inspection information.	Suo & Stewart	2009
Analysis of the Brazilian federal bridge inventory.	Oliveira et al.	2019
Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites.	Yang et al.	2010
Concrete in Marine environment.	Mehta et al.	1992

2.2.1. Contextualização do BIM

Segundo Eastman et al. (2008), a modelagem da informação da construção, mais conhecido como BIM, é uma nova tecnologia promissora na indústria AEC. Com essa nova metodologia é possível a elaboração de um modelo virtual com objetos parametrizados, que quando completo é capaz de dar um suporte mais preciso à construção quando comparado com o método tradicional baseado em desenhos provenientes do CAD. Além disso, com o BIM é possível antecipar problemas que podem ocorrer durante a construção e fazer modificações rápidas e eficientes em projetos. Quando implementado de forma correta, todas as equipes trabalham de forma integrada, obtendo assim uma melhoria em todo o processo e tendo como resultado uma melhoria na qualidade, nos custos e principalmente nos impactos decorrentes de projetos ineficientes. Vale salientar, que a utilização de softwares que permitem o desenvolvimento de modelo em um ambiente BIM, por si só não configura a metodologia. O BIM

vai muito além da utilização de softwares, pois ele envolve também uma concepção de ambiente colaborativo e integrado, garantindo um fluxo de informações mais dinâmico entre as equipes envolvidas.

Em complemento à primeira definição, pode-se dizer que o BIM é uma metodologia que utiliza softwares de modelagem para proporcionar melhores características físicas e funcionais de uma instalação. Dessa forma, ele pode ser explorado como recurso de conhecimento compartilhado que auxilia de forma eficiente nas tomadas de decisões durante todo o ciclo de vida do empreendimento, i.e., desde as fases conceituais até o fim da sua vida útil. Segundo Seif (2016) o conceito básico dessa nova metodologia é a integração de diferentes partes interessadas de determinado projeto para inserir, extrair, atualizar ou modificar informações que são fundamentais para a melhoria do ciclo de vida do empreendimento.

Por fim, segundo o CPIC (*Construction Project Information Committee*) o BIM pode ser definido como a arte da gestão e coleta de informações que devem ser compartilhadas, percorrendo todo o ciclo de vida. Além disso, propõe o uso do BIM em diversas áreas do conhecimento. Também vale ressaltar que projetos de infraestrutura são constituídos de processos mais complexos, que requer ainda mais um ambiente colaborativo. Além disso, a utilização da metodologia BIM na área de infraestrutura é muito mais voltada para gestão e monitoramento, diferente da utilização do BIM em obras de edificações, que ainda possui uma abordagem voltada para a elaboração de modelos 3D.

Estudos como o realizado por Dave et al. (2010) que aplica o uso do Visilean, uma ferramenta que proporciona o controle de planejamento do fluxo de trabalho em um projeto piloto de monitoramento e gestão do tráfego em vias do Reino Unido. O objetivo é proporcionar uma visualização do processo de planejamento e dessa forma melhorar a confiabilidade da gestão, pois o acesso às informações torna-se mais completa e atualizada.

Apesar de ter encontrado diversas barreiras para a finalização do projeto, principalmente devido à falta de parametrização e interoperabilidade de alguns softwares, o autor chegou a diversas lições aprendidas tais como: para a eficácia do Visilean, a parametrização deve ser adequada; o processo de colaboração entre os envolvidos afetam diretamente a eficiência da metodologia e por fim, o

envolvimento dos colaboradores da cadeia de suprimentos deve ser inserido no processo, em todas as fases do projeto.

O trabalho realizado por Kumar et al. (2017), consisti na aplicação do BIM em um projeto de autoestradas que liga Glasgow a Edimburgo, na Escócia, sem nenhuma obrigação contratual. O projeto foi realizado usando os padrões tradicionais com o CAD e também utilizando a metodologia BIM. O intuito foi avaliar benefícios e barreiras inerentes à nova metodologia e dessa forma identificar a contribuição do BIM em projetos futuros.

As principais expectativas dos contratantes com a implementação do BIM no projeto foram:

- Redução de riscos de coordenação entre as equipes;
- Minimização dos conflitos operacionais e contratuais, principalmente devido à falta de interoperabilidade dos métodos tradicionais e;
- Aumento do compartilhamento de experiências anteriores.

Os resultados obtidos no trabalho citado foram:

- Melhora dos processos de coordenação;
- Maior rapidez na identificação de incompatibilidades e ganhos no gerenciamento de alterações de projeto;
- Melhor visualização de insumos e da construtibilidade com a utilização de modelos 3D e 4D.

Por fim o estudo apresentou as diferenças encontradas na adoção do BIM e dos métodos tradicionais, que foram desenvolvidos paralelamente. O parâmetro utilizado para a comparação foi o tempo gasto para a realização da tarefa. Na Tabela 5 são apresentados as atividades analisadas e o tempo gasto em cada metodologia para a realização das mesmas.

Tabela 5 – Comparação entre o uso do CAD e BIM em um projeto de autoestradas.

Data	Projeto Analisado	BIM (horas)	Tradicional (CAD) (horas)
05/03/2015	Revisão do projeto da faixa de acesso A725 SB	1	8
05/03/2015	Revisão do projeto geométrico temporário TW25-26	1	4

06/03/2015	Revisão do projeto geométrico temporário TW27-28 e alternativas	1	4
06/03/2015	Revisão do projeto geométrico TW07-08	0.5	4
06/03/2015	Revisão do projeto geométrico TW09-10 parte 1 e parte 3	0.5	3
06/03/2015	Desenvolvimento de nova proposta de acesso	1	4
19/03/2015	Seção transversal da rotatória incluindo alinhamento, serviços públicos e drenagem.	1	4
19/03/2015	Verificação dos novos projetos recebidos	2	8
20/03/2015	Geração da seção transversal S105 das vigas e diafragmas	1.5	5
20/03/2015	Verificação de incompatibilidades entre o novo projeto e o sistema de drenagem existente na M74 SB	0.5	8
25/03/2015	Geração da seção transversal no S201B das contenções	0.5	8
26/03/2015	projeto geométrico temporário e revisão do projeto da rotatória Norte e outras propostas	2	8
06/04/2015	Projeto geométrico temporário TW01-02 e revisão do projeto	2	8
06/04/2015	Projeto geométrico temporário TW07-08 e revisão do projeto	0.5	4
	TOTAL	15	80

A partir da Tabela 5 os autores observaram que o tempo gasto para a realização das atividades em um ambiente BIM é mais de cinco vezes inferior ao tempo gasto para a mesma atividade realizada através dos métodos tradicionais.

Shou et al. (2015) realizou um estudo comparativo para avaliar as diferenças entre a implementação do BIM em edificações e infraestrutura. A principal diferença está relacionada com a fase do empreendimento em que ocorre a maior utilização da metodologia. Um levantamento feito em diversos projetos ao redor do mundo, incluindo Estados Unidos, Índia, Singapura e Canadá, o uso do BIM é implementado apenas nas fases de projeto conceitual e básico. Em contrapartida, o uso em edificações se estende ainda para fases mais avançadas, como planejamento e construção.

Pode-se então perceber que dentre as definições apresentadas, juntamente com todos os trabalhos que vêm sendo desenvolvidos, a metodologia é composta por quatro premissas básicas que incluem a colaboração, representação, processo

e ciclo de vida, que quando integradas de forma correta, resultam em projetos mais eficientes, inovadores e sustentáveis (Bradley et al., 2016).

Diante desse contexto de gestão além da modelagem em um ambiente BIM, há a necessidade de um fluxo de informações mais dinâmico e direcionado. Para que isso se realize é de fundamental importância que se criem novos fluxos de trabalho representados através de mapas de processos.

O IDM (*Information Delivery Manual*) é um tipo de mapa de processos utilizado na padronização e elaboração de formatos em IFC (*Industry Foundation Class*) para mapeamentos de informações. De acordo com a ISO 29481-1:2016, o IDM proporciona um suporte na utilização do BIM, visto que a disponibilidade e qualidade das informações torna o processo muito mais eficiente e dinâmico, garantindo a essência da metodologia.

O mapeamento da informação pode ser utilizado em vários tipos de análise. Um exemplo é o mapa proposto por Pinheiro et al. (2018) para a simulação do desempenho energético de um edifício. Santos et al. (2019) utiliza também o IDM para uma análise de sustentabilidade através da avaliação do ciclo de vida de edifícios. Ainda foi encontrado um estudo realizado por Sacks et al. (2018) no qual ele utiliza um mapa de processos para tornar as avaliações de manutenção e reconstrução de obras de infraestrutura mais fluidas.

2.2.2. Ciclo de vida

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um fluxo de trabalho que considere o ciclo de vida do empreendimento ainda na fase conceitual do projeto. Esta seção apresenta uma revisão da literatura sobre o ciclo de vida de pontes e viadutos, considerando todos os processos envolvidos no decorrer de um projeto, tais como custos, degradação e impactos ambientais.

Kendall et al. (2008) desenvolveu uma pesquisa que consiste na análise do ciclo de vida de pontes de concreto armado. O estudo demonstra que, apesar dos custos iniciais de construção, considerando melhorias na estrutura, serem mais elevados, os custos e os impactos são muito inferiores quando considerado todo o ciclo de vida do empreendimento. Além disso, aborda uma avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment – LCA*), que considera os impactos ambientais e

econômicos e como resultado evidencia a necessidade de um estudo de viabilidade durante a fase de tomada de decisões, considerando todo o ciclo de vida e não somente os custos iniciais. Além disso, a pesquisa levou em consideração os impactos indiretos, referentes aos usuários e ao entorno.

Segundo Ryall (2001), o ciclo de vida de uma ponte tem início na sua concepção e vai até o fim de sua vida útil, caracterizada por uma inutilização ou demolição. O autor dividiu o ciclo em concepção, projeto, construção, operação e demolição/colapso, sendo o tempo de operação o seu tempo de vida útil. Para o autor, quando o objetivo é tornar as estruturas cada vez mais duráveis, considerações devem ser feitas em cada parte desse ciclo.

Apesar do escopo do presente trabalho ser focado nas etapas de concepção do projeto, uma descrição breve de todo o ciclo de vida de pontes e viadutos é apresentada. As considerações que devem ser avaliadas a respeito de alguns cuidados que devem ser considerados em cada etapa do ciclo de vida da estrutura de acordo com Gonçalves (2009) são:

- **Concepção:** Nessa etapa é importante um estudo de viabilidade de considerações a serem feitas no projeto, analisando custo e definindo os objetivos e função do empreendimento, garantindo ainda a qualidade do projeto, construção e manutenção da estrutura.
- **Projeto:** Nessa etapa um estudo de soluções alternativas tanto para os métodos construtivos, como materiais e metodologias, devem ser abordados com o intuito de obter projetos eficientes e que possam atingir a vida útil esperada. Além disso, especificações de projetos também devem ser analisadas e viabilizadas de acordo com as necessidades e impactos que tal estrutura pode acarretar, principalmente devido à sua paralização.
- **Construção:** Na fase de construção, as atenções devem ser voltadas ao controle de qualidade, sendo a construtora a responsável pela fiscalização e garantia de todas as especificações de projeto. Vale ressaltar, que um projeto ótimo por si só, não garante um bom desempenho do empreendimento, essa garantia somente será consolidada caso a execução seja de boa qualidade e fiel ao projeto.

- **Manutenção/Operação:** Para garantir a longevidade da estrutura, planos de inspeção e manutenções periódicas também devem ser realizados e executados, visto que com o passar dos anos, fatores externos podem acarretar uma degradação mais acelerada, principalmente as não previstas em fase de projeto.

A sinergia entre BIM e LCA nas fases iniciais de projeto tem um potencial benéfico no auxílio nas tomadas de decisão, principalmente referente à definição de materiais, especificações de projeto e sistemas construtivos, resultando assim em projetos colaborativos e logo eficientes (Barros & Silva, 2016).

2.2.3.

Durabilidade de estruturas de concreto armado

De acordo com Metha et al. (1992), uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade. Tal conceito define o tempo na qual a estrutura mantém as suas propriedades físicas e químicas, a qualidade de seu desempenho e a sua capacidade de utilização quando em operação.

A NBR 6118 ABNT (2014) define durabilidade como, “Durabilidade consiste na capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração dos projetos” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

Com essa definição, vale ressaltar novamente a importância em considerar melhorias ainda em fase inicial de projeto, aumentando assim a durabilidade e dessa forma reduzindo os impactos decorrentes de processos precoces de deterioração. Além disso, estudos apontam, como é detalhado nos próximos parágrafos, que quando as melhorias são feitas em fases conceituais, os custos globais são muito menores.

Segundo a Lei de Sitter, também conhecida como Lei dos Cinco, demonstra a relação entre o custo de intervenção e a fase na qual tal intervenção é realizada, deixando evidente que as considerações devem ser realizadas o quanto antes, tornando-as mais eficientes, como pode ser visto na Figura 3 (Calmon & Fiorot, 2006).

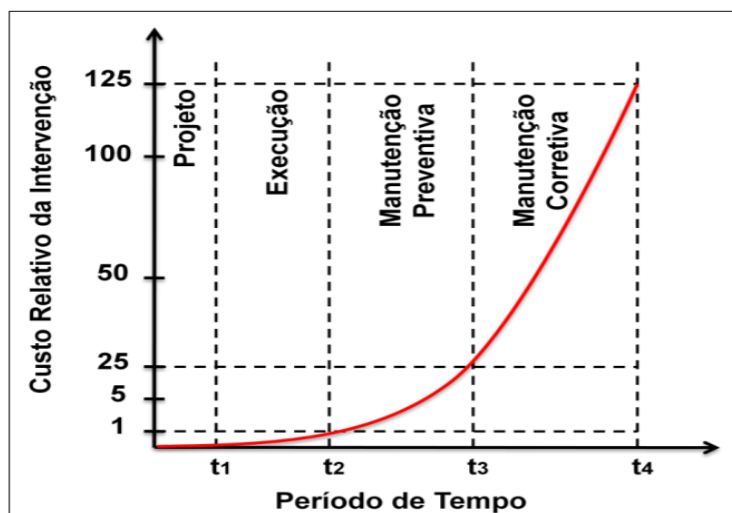


Figura 3 – Lei de Sitter (Helene, 1992 apud Cavalli et al., 2008).

Segundo a Figura 3 apresentada acima, a fase de elaboração de projeto é o momento em que o aumento da durabilidade será atingido através de alternativas como, aumento de cobrimento, diminuição da relação água cimento, utilização de materiais alternativos, melhorias com aditivos entre outros. Nessa etapa, o custo pode ser associado a um peso um, ou seja, as realizações das ações de melhorias nessa etapa não possuem um multiplicador em relação ao seu custo presente.

Na fase de execução, as decisões tomadas já acarretarão um peso cinco vezes maior do que se fossem consideradas na etapa anterior, para se obter o mesmo resultado.

Na terceira etapa, de manutenções preventivas, medidas como impermeabilização, pinturas, limpezas periódicas, dentre outras, que visam assegurar o desempenho da estrutura, custarão cerca de vinte e cinco vezes mais do que se tais medidas tivessem sido consideradas em fase de projeto. Porém vale salientar, que as manutenções preventivas ainda custam cinco vezes menos do que corrigir possíveis danos estruturais que venham a aparecer na estrutura.

Por fim, as manutenções corretivas, correspondentes às atividades de reforços e reparos, acarretam custos cento e vinte e cinco vezes superior àqueles que poderiam ter sido considerados ainda em fase de projeto e que proporcionaria a mesma durabilidade ou até mesmo maior.

Dessa forma é válido considerar que as melhorias devem ser executadas em fases conceituais, pois além de garantir uma eficiência econômica,

potencialmente irá garantir a redução dos impactos sociais e ambientais, compondo assim o Tripé da Sustentabilidade (TBL – *Triple Bottom Line*).

Considerando a forma com que a durabilidade é afetada devido à atuação de algumas patologias como corrosão e fadiga, vale ressaltar que levantamentos como o realizado por Oliveira et al (2019), a corrosão é o mecanismo de degradação mais encontrado em estruturas de concreto armado. Segundo Rocha et al. (2014), a corrosão é responsável por 52% das patologias encontradas em estruturas no Brasil.

Segundo Medeiros et al. (2011) a quantidade de manifestações patológicas que envolvem a corrosão aumentou nos últimos anos no Brasil, principalmente devido à ineficiência do cobrimento, que por muitas é mal dimensionado, mal executado e com materiais de baixa qualidade.

Alexander & Beushausen (2019) afirmam em seu estudo, que a corrosão é a maior ameaça a estruturas de concreto armado, principalmente devido à abertura de fissuras excessivas e ao deslocamento do concreto, que expõe ainda mais as armaduras e dessa forma acelerando ainda mais o processo de degradação.

De acordo com o trabalho realizado por Kim et al. (2016), que relaciona a ação de cargas cíclicas na abertura de fissuras, ficou demonstrado que estruturas que recebem a atuação de tais cargas possuem uma aceleração do processo corrosivo. Dessa forma, pode-se dizer que pontes sujeitas a tráfegos diários intensos estarão sujeitas a uma degradação mais acelerada.

Diante disso, o presente trabalho trata apenas a corrosão como manifestação patológica, uma vez que, de acordo com a literatura, essa é a mais recorrente em estruturas de concreto armado.

2.2.3.1. Corrosão em estruturas de concreto armado

O processo de corrosão é definido como a deterioração de um material devido à ação química, física ou eletroquímica do meio ambiente. Esse tipo de degradação pode ocorrer principalmente em materiais metálicos tais como ligas de cobre e aço (Sheir et al., 1994).

A corrosão proveniente da interação físico-química entre o material e o ambiente no qual ele está inserido, acarreta assim mudanças indesejáveis nas armaduras do concreto armado, tais como desgastes, alterações químicas, modificações estruturais, podendo tornar a estrutura inadequada ao uso (Lourenço et al., 2009).

Como o próprio nome já esclarece, o concreto armado é um material compósito formado por concreto e reforçado com barras de aço. O concreto devido a sua alcalinidade cria uma película aderente ao redor da armadura, que passiva e logo protege as mesmas contra os processos corrosivos. Porém, essa proteção é rompida quando os agentes agressivos penetram através do cobrimento de concreto e dessa forma inicia-se o processo de corrosão. Esse tipo de deterioração é mais acelerado quando a estrutura não foi projetada considerando algumas recomendações tais como espessura do cobrimento, agressividade do meio na qual a estrutura está inserida, dentre outros quesitos de projetos e de execução (ACI Committee 222, 2001).

Um dos parâmetros que são considerados e que depende da agressividade do meio é o cobrimento como mencionado acima. Trata-se de uma camada de concreto que cobre as armaduras, dificultando a exposição das mesmas aos agentes agressivos tais como gás carbônico, íons cloreto, oxigênio e água. A Figura 4 ilustra esse processo (Saad et al., 2015).

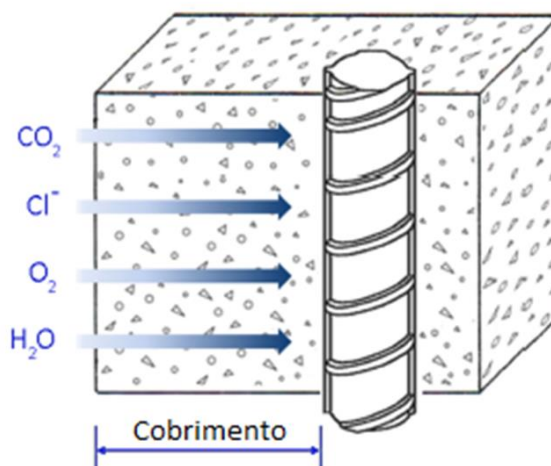


Figura 4 – Migração de agentes agressivos através do cobrimento (Adaptada de Saad et al., 2015).

Vale ressaltar que existem diversos fatores que influenciam diretamente na aceleração ou inibição do processo corrosivo, envolvendo não apenas o projeto por si só, mas também a qualidade dos materiais e execução do projeto.

Um estudo realizado por Gjorv (2015) observou que a penetração de agentes agressivos, tais como cloretos, atuam de forma mais agressiva em partes que estão menos expostas aos ventos não provenientes do mar. A explicação se deve ao fato dessas partes estarem menos suscetíveis a lavagens periódicas dos agentes pelas chuvas na superfície do concreto. A Figura 5 apresenta as porcentagens de cloretos na superfície do concreto considerando a ação do vento.

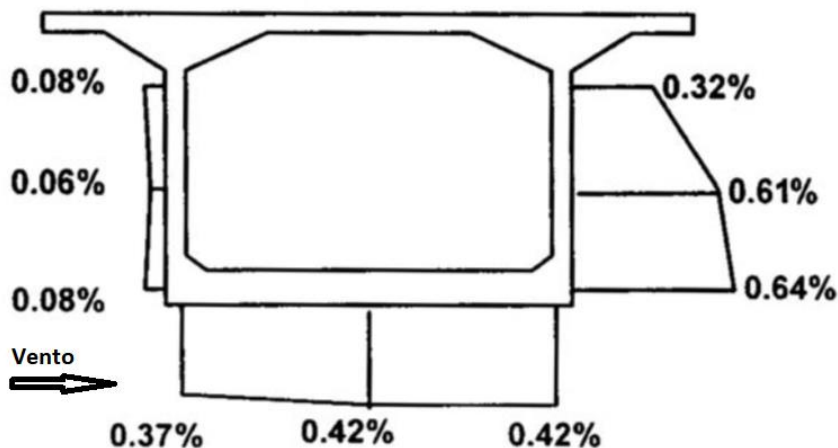


Figura 5 – Quantidade de cloreto na superfície do concreto considerando a direção do vento (Adaptada de Gjorv, 2015).

Diante disso, vale salientar que um estudo inicial, ainda em fase de projeto, deve envolver não apenas especificações usuais de projeto, mas sim um envolvimento integrado com todas as equipes, que possam inclusive considerar a posição e geometria da estrutura.

Um dos resultados diretos da corrosão é a redução da seção transversal da armadura e logo a perda de resistência da mesma, reduzindo assim o tempo de vida útil da estrutura. A redução de resistência é um processo em função do tempo e por isso, uma previsão precisa desse tempo é de fundamental importância para uma avaliação da viabilidade econômica (Ma et al., 2014).

Além disso, outro resultado da corrosão é a formação de uma camada de ferrugem na superfície das armaduras, que ocupam um volume muito maior do que o aço não corroído, podendo chegar a um volume três vezes maior. Dessa

forma, tensões são formadas nas proximidades da interface aço/concreto e acarretando o aumento das fissuras e posteriormente o deslocamento do concreto. Isso resulta em uma exposição total das armaduras aos agentes agressivos, propiciando um cenário agressivo de deterioração da estrutura.

Diante disso, muitos estudos experimentais têm sido realizados para avaliar o desempenho estrutural em estruturas submetidas ao processo de corrosão. Alguns métodos determinísticos foram propostos para auxiliar na predição das duas etapas pelas quais o processo de corrosão se consolida. Essas etapas são o tempo em que se inicia a corrosão e o tempo de propagação da mesma (Ma et al., 2014). A Figura 6 ilustra a relação entre o tempo e degradação, explicitando as duas etapas da corrosão.

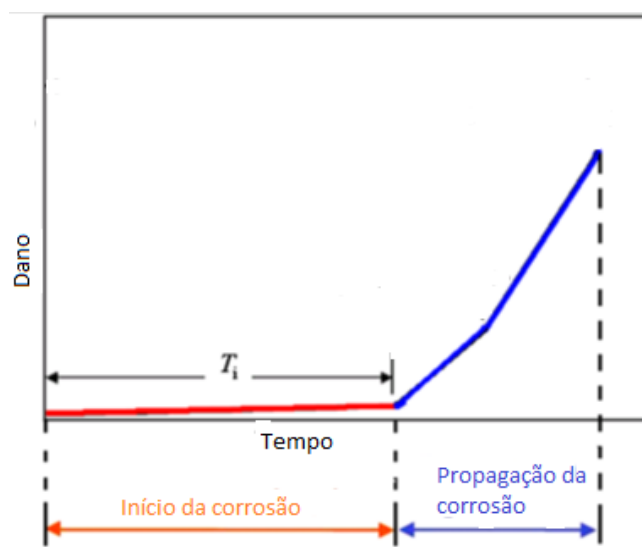


Figura 6 – Etapas da deterioração das armaduras devido ao processo de corrosão.

(Adaptado de Saad et al., 2015).

Segundo Thoft-Christensen et al.(1996) o início da corrosão ocorre quando a camada protetora, mantida devido ao elevado pH na solução dos poros do concreto, é quebrada. Diversos fatores irão influenciar esse tempo de início da corrosão, tais como a agressividade do meio, a quantidade de íons cloreto presente na superfície do concreto, o cobrimento nominal e a relação água/cimento assim como a presença ou não de aditivos (Suo & Stewart, 2009).

No presente trabalho será considerado o processo de corrosão devido apenas à intrusão de cloretos, pois esse é o processo mais grave e mais comum de corrosão (Thoft-Christensen et al., 1996). O modelo numérico utilizado na pesquisa para prever o tempo de início da corrosão foi o proposto por Thoft-

Christensen et al. (1996). Devido à sua consistência e utilização na grande maioria das pesquisas de corrosão encontradas na literatura, esse modelo se baseia na Lei de Ficks de Difusão.

Diante do grande número de obras de infraestrutura presente no Brasil e devido ao expressivo envelhecimento das mesmas, a necessidade de pesquisas para desenvolver sistemas de gerenciamento para manutenção é de suma importância. Um recente estudo realizado por Oliveira et al. (2019) juntamente com o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), vem desenvolvendo o Sistema Brasileiro de Gerenciamento de Pontes (SGO). Esse estudo contempla um inventário de diversas pontes em diversas rodovias do Brasil. O principal objetivo desse sistema é conseguir prever as condições na qual as pontes se encontram, garantindo assim uma melhor gestão para a manutenção das mesmas.

O sistema é atualizado através de inspeções, com entrada de imagens, desenhos esquemáticos bem como vídeos. O inventário atual possui 4725 estruturas, sendo 99,2% de concreto armado. Dentre essas, 2764 apresenta sistema estrutural composto de tabuleiros apoiados em vigas, ambos de concreto armado. Dessa forma, vale considerar uma maior atenção para esse tipo de estrutura. Outra informação importante do estudo é a data de construção das pontes, porém apenas 1032 tiveram suas datas registradas, principalmente devido à ausência de uma gestão de documentos na época. Além disso, o estudo registrou a corrosão como a principal patologia, correspondendo a 66% dos casos analisados.

A importância desses dados está diretamente ligada à degradação precoce das estruturas, visto que as normas vigentes nessas décadas apresentavam especificações muito menos conservadoras, tanto em relação a questões de geometria quanto para carregamentos devido ao tráfego.

Outro problema relatado na literatura, diz respeito à degradação precoce dos aparelhos de apoio. Segundo Yang et al. (2010) os aparelhos de apoio apresentam uma vida útil muito inferior ao da estrutura completa. Dessa forma, a necessidade de manutenção e substituição de tais elementos é indispensável para o bom desempenho da estrutura. Porém, em reunião informa com o engenheiro Geraldo Filizola, projetista renomado em projetos de pontes, o mesmo relatou

que a ausência de acessibilidade, muitas vezes impossibilita o reparo ou a substituição dos aparelhos de apoio. Dessa forma, vale salientar mais uma vez, a necessidade em prever melhorias e considerações ainda em fase de projeto.

A pesquisa também contemplou a análise da localização geográfica das pontes em relação à quantidade de ocorrência de estruturas em estágio avançado de degradação. A região Nordeste, onde será realizado o estudo de caso do presente trabalho, apresentou estruturas em situações mais críticas, justificado pelo clima semiárido.

Ainda nesse trabalho, é citado problemas de deterioração relacionados à carga de tráfego, porém dentre as pontes estudadas, aquelas que apresentaram tráfego com maior carga de trem tipo, apresentaram um bom estado de conservação. Isso está relacionado à época em que foi realizado o projeto, visto que pontes mais modernas, com características de durabilidade aprimoradas, apresentam um melhor desempenho.

O principal motivo analisado na grande maioria dos estudos presentes na literatura, a respeito de degradação de estruturas de concreto, está ligado ao grande potencial de impacto que tais empreendimentos causam em seu entorno. Dessa forma, a importância da previsão do início dos processos de degradação, ainda em fase de projeto, possibilita uma análise a respeito de medidas e considerações que potencialmente podem prolongar a vida útil dessas estruturas, garantindo assim empreendimentos mais sustentáveis, isto é, garantindo não só uma redução dos impactos econômicos, mas também os ambientais e sociais.

2.2.4. Sustentabilidade

Existem diversas definições para o termo sustentabilidade, porém a mais amplamente usada é a da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED – *World Commission on Environment and Development*): “Desenvolvimento que atenta às necessidade do presente sem comprometer a capacidade de gerações futuras de atender suas necessidades” (Guerra & Lopes, 2015). Porém, mesmo que seja um termo frequentemente discutido, ainda existem muitas definições equivocadas, principalmente em associar o termo sustentabilidade apenas a impactos ambientais.

Com o propósito de apresentar uma visão mais ampla a respeito da sustentabilidade, Elkington (2013) apresentou o Tripé da Sustentabilidade (TBL – *Triple Bottom Line*) na qual aborda o equilíbrio entre os âmbitos ambientais, econômicos e sociais.

A parcela econômica é referente aos custos de projeto, produção, construção, manutenção, operação e demolição, o que configura um ciclo de vida completo. Segundo Frangopol et al. (2017) um estudo eficiente do custo do ciclo de vida deve ser fundamental para a tomada de decisões, principalmente na fase de projeto.

No quesito ambiental a sustentabilidade refere-se à redução da poluição, diminuição do consumo de materiais, eficiência energética e também a redução dos acidentes ambientais, como os recentemente ocorridos no Brasil nos municípios de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, ambos possivelmente evitáveis.

Nesse âmbito, vale ressaltar a importância de uma avaliação do ciclo de vida, que envolve todo o processo de obtenção dos materiais, indo desde a extração até o descarte dos resíduos. Dessa forma com a avaliação do ciclo de vida é possível quantificar o potencial de impacto de determinado serviço ou produto. Rebitzer et al. (2004) propõe exatamente uma avaliação de todos os impactos gerados na elaboração de determinado produto. Além disso, o estudo expõe os desafios apresentados na obtenção de dados, principalmente devido à falta de padronização de medição dos impactos. Para contextualizar o trabalho realizado na presente pesquisa, os impactos ambientais para a aquisição de materiais como aço e cimento que foram considerados, são apresentados na Figura 7.

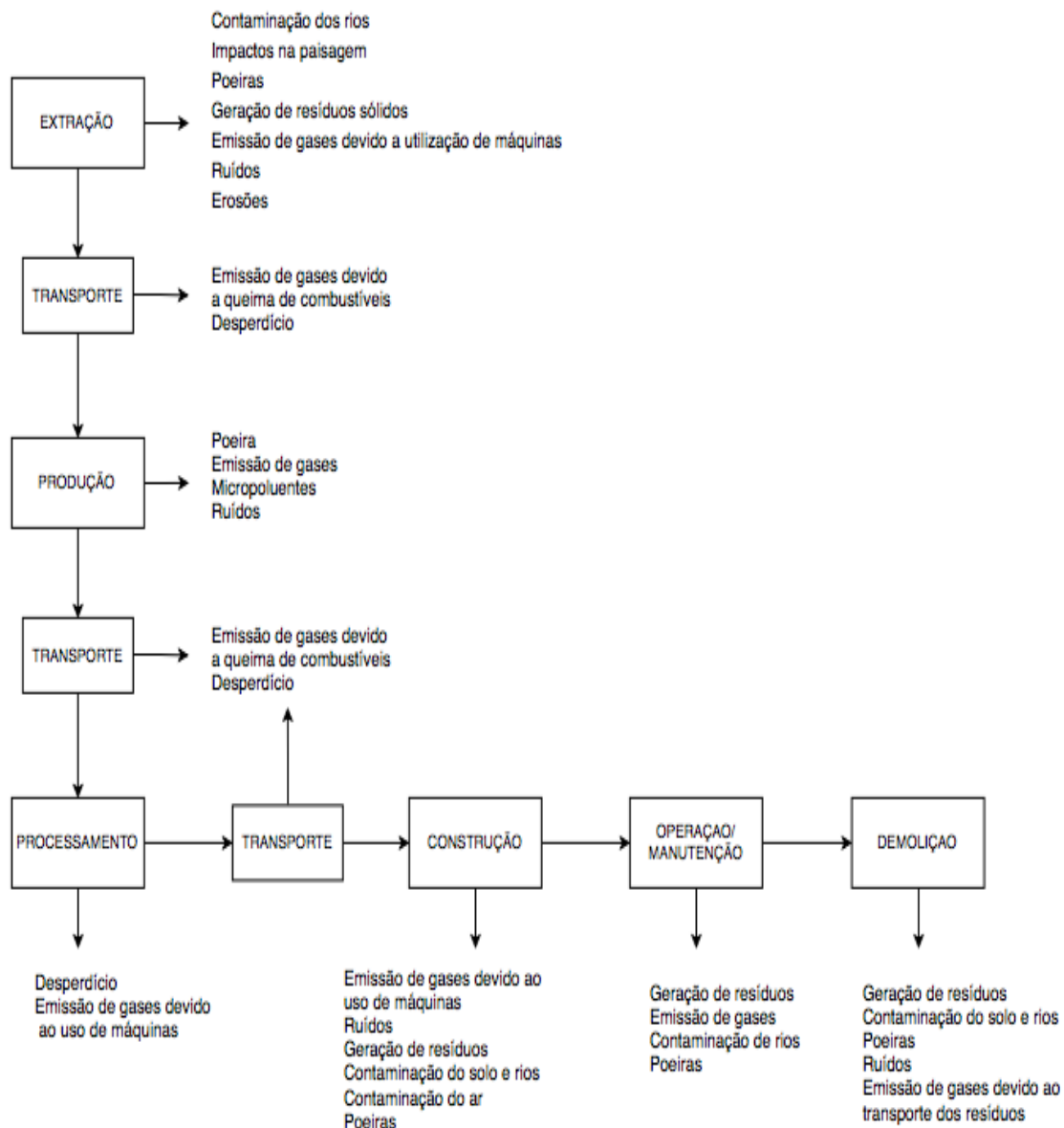


Figura 7 – Impactos gerados no processo de obtenção de materiais da construção.

Essa análise do ciclo de vida, tanto econômica quanto ambiental torna-se muito mais eficiente quando realizada em um ambiente colaborativo e com informações claras e disponíveis, durante todas as etapas. No trabalho realizado por Santos et al. (2019) é abordada a sinergia existente entre BIM e ciclo de vida, apresentada através de um fluxo de trabalho na qual as informações são trocadas entre produtores, especialistas em ciclo de vida e um gerente BIM, obtendo como resultado uma maior confiabilidade e assertividade na análise do ciclo de vida.

Diante desse cenário, em que os materiais utilizados na indústria AEC possuem um grande potencial poluente na sua fase de produção, novas metodologias no desenvolvimento de projetos devem ser implementadas, com o intuito de reduzir cada vez mais esses impactos, principalmente considerando todo o seu ciclo de vida (Machado & Moreira, 2015).

Por fim, pode-se afirmar que um empreendimento é sustentável quando, além de quesitos ecológicos e ambientais são contemplados, também são considerados técnicas e uso de materiais alternativos que garantam um prolongamento do tempo de vida útil da estrutura (Machado & Moreira, 2015).

No estudo de Borges et al. (2018) os impactos ambientais, referentes à produção de materiais de construção, são padronizados em equivalência de dióxido de carbono (CO₂). Nesse processo, as quantidades de CO₂ são computadas considerando a extração de matérias primas, produção de materiais, transporte e construção. Além disso, são contabilizadas as emissões devido à fase operacional e de demolição. Dessa forma, os impactos ambientais quantificados no presente trabalho serão apresentados em kg CO₂.

Por fim, e não menos importante, o impacto social no setor da construção civil, abrange a qualidade de vida dos seus trabalhadores, a geração de emprego, problemas no entorno e mudanças de rotas devido a interdições de rodovias, pontes ou viadutos. Vale ressaltar que não foram encontradas pesquisas na qual mensurasse tal impacto, principalmente porque esse impacto tende a ser específico à localização geográfica da estrutura.

3

Método de pesquisa

A metodologia de pesquisa adotada é baseada em uma proposta de um novo processo de trabalho consistente com a metodologia BIM que considera o ciclo de vida de obras de infraestrutura, mais especificamente pontes e viadutos, durante a fase de projeto conceitual. Para isso, é proposto um mapa de processo que leva em consideração a análise de diferentes alternativas de especificações do projeto ainda durante as fases iniciais do mesmo. Inserido dentro de um contexto BIM, esse mapa de processos permite e usufrui da colaboração e comunicação entre todos os atores envolvidos no projeto. Para auxiliar na avaliação destas alternativas de projeto, foi desenvolvido um aplicativo que permite a previsão do início da corrosão das armaduras de pontes em concreto armado considerando parâmetros de projeto tais como cobertura, fator água cimento, distância da costa ou ambiente industrial e o tipo de armadura utilizada. Além disso, o aplicativo pode ser utilizado para analisar o custo destas alternativas como parte do processo de decisão para a escolha da alternativa mais viável para o projeto. O estudo de caso desenvolvido tem como objetivo demonstrar a aplicação da metodologia proposta, demonstrando o uso de como um mapa de processos pode contribuir para a eficiência na tomada de decisões ainda na fase conceitual de projeto.

3.1.

Mapa de processos

Esta seção apresenta o mapa de processos que foi desenvolvido para mapear o fluxo de informações entre os diversos atores envolvidos na elaboração de um projeto conceitual de pontes de concreto armado em um ambiente BIM. O Manual de Entrega de Informações (IDM – *Integrated Delivery Manual*), que se encaixa dentro do conceito de mapa de processos, foi utilizado para mapear as informações.

Para a elaboração do IDM proposto, foram consultadas regulamentações e notações que visam à criação dos mesmos, tais como a Notação e Modelo de Processos de Negócios (BPMN – *Business Process Model and Notation*). Além disso, para obter informações suficientes para a parte técnica do fluxograma, foram feitos contatos informais com engenheiros projetistas com experiência sólida em projetos de pontes. Durante esses encontros, foram abordados assuntos como utilização de metodologias tradicionais, os principais problemas encontrados devido à utilização desses processos usuais, quais os tipos de informações e critérios que seriam importantes serem discutidos em fases iniciais da elaboração dos projetos e, principalmente, quais os atores que são responsáveis e participam da elaboração de um projeto de infraestrutura. Com base nisso, foram definidos os atores mais relevantes no processo e suas respectivas atribuições. A seguir são apresentados os atores envolvidos no processo e suas funções.

- Cliente: A atribuição do cliente é definir o escopo do projeto, apresentando suas necessidades e requisitos do seu desejado empreendimento. Durante todo o desenvolvimento do projeto o cliente tem o papel de aprovar, solicitar ou requisitar alterações no projeto. No contexto de obras de infraestrutura, dificilmente o cliente irá se tratar de uma única pessoa, mas sim de uma instituição, órgão público dentre outros.
- Construtora: O empreiteiro é responsável por participar, junto com o arquiteto (quando se trata de uma obra de arte), engenheiro estrutural e geotécnico, na definição do método construtivo mais adequado e disponível para o empreendimento, garantindo dessa forma que todo o projeto seja executado com as técnicas e métodos definidos no projeto. Dessa forma, a construção será mais fiel ao projeto, pois já serão definidos equipamentos requisitados, mão de obra especializada necessária dentre outros, antes do início da execução da obra, evitando assim mudanças durante a execução. Além disso, a construtora será responsável pela elaboração do programa de necessidades a partir dos requisitos do cliente.

- Engenharia de rodovias: O papel desse ator é a elaboração do projeto geométrico da rodovia. O projeto consiste em adequar a geometria física do terreno com as condições de segurança, conforto e operação dos veículos. Em complemento, e não menos importante, a equipe responsável pela elaboração do projeto deve garantir que a implantação de uma ponte, rodovia, viaduto ou outra obra de infraestrutura seja possível de ser executada, seja viável economicamente e ambientalmente e que seja socialmente abrangente.
- Topografia: A equipe de topografia é responsável por determinar a localização, a orientação e determinar de forma precisa o relevo na qual estará inserido o empreendimento, apresentando todas as informações em uma planta topográfica que é fundamental para a elaboração do projeto geométrico e estrutural. Apesar de ser um ator que apresenta uma participação breve, a qualidade desse projeto é muito relevante, principalmente em obras de infraestrutura que possuem uma linearidade horizontal e que dessa forma necessitam de uma precisão elevada devido à necessidade de encontro de eixos e níveis.
- Geologia: A equipe de geologia é de fundamental importância para estudos e reconhecimento do solo, identificando os tipos de solo em cada camada e por fim elaborando um perfil geotécnico do local. Esse projeto é recebido pelo engenheiro geotécnico, que a partir disso irá definir o tipo de fundação mais adequado e todo o seu dimensionamento.
- Arquitetura: O papel do arquiteto na concepção de projetos de infraestrutura é em alguns casos indispensável. Porém no fluxo de trabalho proposto o arquiteto foi apresentado como ator condicional, visto que caso seja necessário e requisitado pelo cliente uma forma esteticamente especial, será solicitado a participação do arquiteto no processo, caso contrário, o arquiteto não participa do fluxo de trabalho. Para os casos em que o arquiteto seja necessário, ele é responsável pela elaboração do projeto arquitetônico e por decisões que envolvam a equipe de estruturas e a empreiteira responsável.

- Gerente de planejamento: Essa gerência é responsável pelos cronogramas físico e financeiro da execução do projeto. Esse ator que proporciona a conexão entre o projeto e a obra, definindo os parâmetros de construtibilidade ainda na fase de projeto. Além disso, essa função é responsável pelo suporte na viabilidade do empreendimento, fornecendo dados de tempo e custo. Dentro de um ambiente BIM, o gerente de projeto é responsável ainda pela modelagem 4D e 5D, que consiste no cronograma da obra e o orçamento da mesma, respectivamente, bem como a simulação virtual da construção.
- Gerente BIM: O gerente BIM terá o papel da gestão das informações e gerenciamento dos processos. Esse ator deve ter uma visão ampla e multidisciplinar indo desde a elaboração e atualização do plano de execução BIM, passando pelo suporte de TI e finalmente garantindo a colaboração e integração dos atores em um ambiente BIM. Além disso, é esse ator que deve estabelecer o fluxo da informação através de mapa de processos. De uma forma geral, o gerente BIM é responsável pelo suporte de tecnologia, mapeamento de processos, e garantia que a metodologia BIM seja, de fato, executada, integrando pessoas, tecnologia, processos e gerenciamento, alcançando assim a eficiência do projeto final.
- Engenharia estrutural: A equipe de engenharia estrutural é responsável pela elaboração do projeto estrutural, abrangendo o dimensionamento e detalhamento de vigas, pilares, tabuleiros, fundação dentre outros elementos estruturais.
- Engenharia geotécnica: A responsabilidade desse ator no proposto processo é definir o tipo de fundação baseado no perfil gerado pela equipe de geologia, estudar a necessidade de obras de contenções, planejar e prever possíveis movimentos de terra e, finalmente, elaborar os projetos geotécnicos com dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais da subestrutura.

O IDM completo é apresentado no Apêndice A. Na Figura 8 está apresentada uma versão ilustrativa do IDM com destaque para os principais temas e grupos abordados no mesmo.

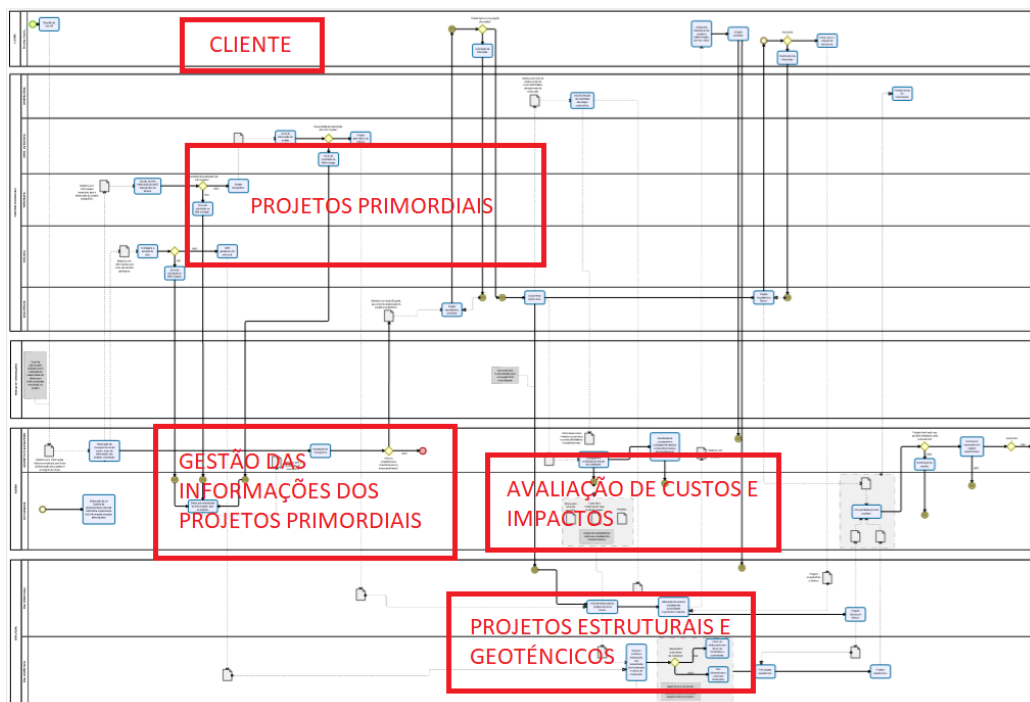


Figura 8 – Versão ilustrativa do IDM assim como os principais temas e grupos abordados no mesmo.

O mapa de processos se inicia com uma reunião de *kickoff* com o cliente, no qual, usualmente o construtor coleta todos os requisitos e necessidades do cliente. Após a formação da equipe, o BIM manager já inicia um estudo preliminar de qual sistema de gerenciamento das informações e definição das ferramentas devem ser utilizadas por cada equipe, dessa forma, é possível garantir a maior adequação das ferramentas e processos para cada equipe.

Após o levantamento de dados e elaboração do programa de necessidades, o gerente de planejamento elabora relatórios com tais informações e o cronograma básico que são enviados às equipes, podendo essas dar início aos seus estudos preliminares. Vale ressaltar que esse canal de comunicação entre o cliente e o gerente de planejamento é muito utilizado na obtenção de todas as informações essenciais para as demais equipes, dando assim dinamismo e acurácia aos dados dos projetos.

Inicialmente, o relatório elaborado pelo gerente de projetos é enviado para a equipe de topografia e geologia que são etapas primordiais para a elaboração

de projetos de infraestrutura. Uma vez recebido, a equipe de topografia dá início aos estudos do relevo local, realizando o levantamento topográfico e elaborando o perfil topográfico local. Durante este processo, caso seja necessário, solicitações de informações adicionais podem ser requisitadas ao gerente de planejamento que detém e providencia as informações desejadas. Esse evento pode ser encontrado no mapa de processos através de um condicional que responde sim ou não para a necessidade de informações adicionais. Caso as informações iniciais sejam suficientes para a conclusão do projeto topográfico, a equipe finaliza e envia para a equipe que realiza o projeto geométrico da rodovia, caso contrário é feita a solicitação de atualização, garantindo assim que os projetos tenham acurácia. Concomitante, a equipe de geologia realiza os estudos do solo, definindo os ensaios e sondagens necessárias para a elaboração do perfil geotécnico local. Finalizada essa atividade, o estudo geológico é enviado à equipe de engenharia geotécnica, que iniciará as atividades referentes à subestrutura.

No fluxo de trabalho proposto, a equipe responsável pela elaboração do projeto geométrico recebe o perfil topográfico. Vale salientar que o perfil topográfico é de suma importância para traçar a geometria das vias, principalmente por se tratar de empreendimentos horizontais que são guiados por eixos e níveis ao longo do seu comprimento. Após receber tais informações, a equipe de engenheiros de rodovias inicia a elaboração do projeto geométrico, passando inicialmente por uma análise topográfica local e dessa forma verificando a necessidade de atualização das informações recebidas. Caso necessite de informações extras, a equipe envia uma solicitação ao gerente de planejamento que providencia tais atualizações com as equipes diretamente envolvidas nessa atividade. Com o projeto geométrico concluído, este é disponibilizado para as equipes, mas principalmente é enviado para a equipe de engenharia estrutural que inicia a elaboração do projeto estrutural.

Paralelamente a essa parte inicial, o gerente de projeto analisa junto aos documentos da reunião de *kickoff* com o cliente se há necessidade de um estudo de forma e estética da estrutura. A partir dessa análise e discussão com o cliente é possível decidir a inclusão ou não do arquiteto no fluxo de trabalho. Baseado em encontros informais realizados com profissionais da área, como mencionado

anteriormente, a figura do arquiteto em projetos de infraestrutura, usualmente, é irrelevante, visto que a maior parte delas dispensam estruturas rebuscadas e com uma estética mais atraente. Porém, existem casos, principalmente pontes, que essa necessidade se faz obrigatória, como é o caso de estruturas localizadas em grandes centros urbanos e que além de garantir a melhoria no fluxo do tráfego, devem proporcionar harmonização com o plano diretor urbano, e ocasionalmente, até se tornar um ponto turístico local.

Junto a esses processos primordiais, o gerente de projeto tem por função a elaboração de cronogramas e atualização dos mesmos. Além disso, deve fiscalizar e garantir a qualidade das atividades que estão sendo realizadas. O gerente BIM, deve convocar treinamentos e reuniões esporádicas para avaliar o andamento da metodologia BIM e garantir que a comunicação dos softwares está tendo a eficiência adequada.

Caso o arquiteto seja requisitado, ele elabora o projeto conceitual de arquitetura e envia para a construtora. A construtora recebe essas informações e inicia quais estratégias serão mais viáveis para a construção, considerando construtibilidade e dessa forma contribuindo para um projeto arquitetônico básico compatibilizado e integrados com os demais projetos, como os estruturais. Nessa fase de decisão, o gerente de projeto juntamente com a equipe de engenharia estrutural e empreiteira discute a respeito dos melhores métodos construtivos e analisam também se as soluções arquitetônicas são estruturalmente viáveis. Dessa forma, a integração entre essas equipes, juntamente com o gerente de projetos, terá como resultado um projetos compatíveis entre si, visto que a partir do início da execução o próprio construtor já terá conhecimento de detalhes construtivos, materiais e equipamentos necessários, facilitando a gestão dos suprimentos necessários.

A equipe de estruturas, após as decisões feitas anteriormente, inicia a elaboração do projeto estrutural básico. Nesse momento, é iniciada a comunicação com a equipe de geotecnia, que contribuirá para também para o desenvolvimento do projeto estrutural.

Nessa etapa, uma ferramenta foi desenvolvida para auxiliar na tomada de decisão. Os executáveis, que serão apresentados no Capítulo 4, podem ser utilizados para uma análise do tempo de vida útil de determinada estrutura e,

portanto, para avaliar os impactos que as mesmas podem gerar futuramente. Com esse aplicativo, podem ser criados alguns cenários, tais como, aumento do cobrimento de determinados elementos estruturais, modificação do tipo de armadura dentre outros. Além disso, ainda é possível analisar se a estrutura tem um impacto muito elevado, caso seja paralisada, e assim respaldar as necessidades de melhoria nos materiais e considerações de projeto. Vale salientar que esse aplicativo não está incluso no fluxo proposto, porém é uma ferramenta para auxiliar no processo de decisão, ficando a critério das equipes.

Diante disso, o gerente de projeto, juntamente com os engenheiros estruturais elaboram possíveis cenários que são tangíveis ao projeto, considerando durabilidade, orçamento e impactos. Após a elaboração de relatórios contendo todas essas informações, juntamente com um estudo de viabilidade, o mesmo é enviado ao cliente. O cliente avalia os cenários e decide, juntamente com o gerente de projeto, qual atende seus requisitos, orçamento e aos seus ideais de sustentabilidade. Selecionada a solução mais viável, a mesma será enviada novamente ao gerente de projetos e para a equipe de estruturas que seguirá com o processo de finalização do projeto estrutural básico. O mesmo seguirá para a equipe de geotecnia para completar o processo da elaboração do projeto geotécnico, que já foi iniciado e já realizou a análise da necessidade ou não de obras de contenção. Vale salientar que nesse momento o empreiteiro deve participar da definição da subestrutura juntamente com a equipe de geotecnia e o gerente de projetos, visto que alguns tipos de fundações necessitam de técnicas e equipamentos específicos. Dessa maneira é garantido que a execução do projeto será mais bem planejada obtendo assim um resultado mais compatível e fiel ao projeto. Ao final desse processo tem-se o pré-projeto de geotecnia.

Após a finalização de todos os projetos, o gerente de projetos deve fazer uma análise minuciosa dos projetos, verificando incompatibilidades, inconsistências e até mesmo erros de projeto, lembrando que durante todo o projeto tais tarefas são, rotineiramente, avaliadas. Diante disso, a gerência de projetos deve convocar reuniões para solicitar revisão dos projetos e dessa forma passar por uma nova aprovação. Vale salientar que a utilização da metodologia BIM contribui diretamente para a redução das inconsistências e incompatibilidades no projeto.

Com todos os projetos finalizados e revisados, o gerente de projeto envia os mesmos para aprovação nos órgãos responsáveis, tais como Prefeituras, DNER, DNIT, DER dentre outros órgãos necessários. Caso não seja aprovado, o projeto em desacordo retorna ao gerente de projetos que solicita uma revisão às equipes responsáveis. O fluxo de trabalho proposto é finalizado quando todos os projetos estão aprovados.

Vale ressaltar, que o escopo do fluxo de trabalho proposto está restrito em garantir uma melhor eficiência na elaboração de projetos básicos. Porém, deve-se lembrar de que somente um ótimo projeto não garante uma longa vida útil às estruturas, sendo a parte de execução outro fluxo muito importante na garantia de qualidade do resultado final.

3.2.

Método para previsão da degradação de estruturas de concreto armado

3.2.1.

Previsão do início da corrosão

Nesta seção é apresentado o método que foi desenvolvido para prever o tempo em que o início do processo de corrosão ocorre em uma estrutura de concreto armado. Para isso, fatores de maior influência para o início desse processo como o cobrimento, relação água/cimento, distância até a costa ou de regiões industriais e o tipo de armadura utilizada na estrutura são utilizados para o cálculo. As métricas necessárias para essa estimativa foram obtidas a partir de trabalhos encontrados na literatura. A métrica selecionada foi baseada no modelo numérico proposto por Thoft-Christensen et al. (1996) por ser o mais aceito e recomendado dentre todos os analisados.

O modelo de corrosão proposto por Thoft-Christensen et al. (1996) parte do pressuposto que a penetração de cloretos no concreto é função da superfície do concreto e do tempo (t) e pode ser representado pela Lei de Fick de difusão (Crank, 1975) apresentada na Equação 1.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \times \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

Onde:

- $\frac{\partial c}{\partial t}$, taxa de penetração de cloreto no concreto em função do tempo (t);
- D_c , Coeficiente de difusão do cloreto em cm^2/s ;
- c , concentração de íons cloreto em % em relação ao peso de cimento;
- x , distância até a superfície do concreto.

Resolvendo Equação 1, obtém-se a Equação 2, que mostra a função que representa a quantidade de cloreto presente a uma distância x da superfície do concreto em determinado tempo t .

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2 \times \sqrt{D_c \times t}} \right) \right\} \quad (2)$$

Onde:

- $C(x,t)$, quantidade de cloreto presente a uma distância x da superfície em determinado tempo t ;
- C_0 , Quantidade de cloreto na superfície do concreto em % em relação ao peso de cimento.

A partir do modelo proposto acima, isolando o tempo na Equação 2, obtém-se o tempo em que a corrosão se inicia (T_i), como mostra a Equação 3.

$$T_i = \frac{C^2}{4 \times D_c} \times \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_0 - C_{cr}}{C_0} \right) \right]^{-2} \quad (3)$$

Onde:

- C , cobrimento nominal do concreto em mm;
- C_{cr} , Concentração limite de cloreto em % em relação ao peso de cimento.

Segundo Helene et al. (1993), o coeficiente de difusão depende de muitos fatores tais como: tipo de cimento, grau de saturação dos poros baseado na umidade relativa do ar, temperatura, porosidade do concreto, relação água cimento e tipo de íon presente no ar. Dessa forma, encontram-se na literatura propostas de modelos matemáticos bem como resultados de diversos experimentos para a obtenção de tal coeficiente. Porém, os modelos analisados não apresentam parâmetros palpáveis tais como fator água/cimento ou agressividade do meio, os inviabilizando para o uso no presente trabalho. Portanto, foram analisados estudos experimentais que apresentam valores que relacionavam individualmente a relação água/cimento com o valor de coeficiente de difusão e dessa forma foi obtida uma função, descrita a seguir, que relaciona a variação da relação água/cimento com o parâmetro D_c .

A Tabela 6 apresenta os valores do coeficiente de difusão para diferentes relações de fator água/cimento de acordo com diferentes autores que realizaram as pesquisas experimentais. Esses resultados foram plotados em um gráfico como apresentado na Figura 9, junto com a linha de tendência que minimiza os erros de acordo com o método dos mínimos quadrados. Esta linha define a Equação 4 utilizada nesta pesquisa para representar o comportamento da corrosão em função do fator água/cimento.

O método dos mínimos quadrados (MMQ) é uma técnica de otimização matemática utilizada para ajustar um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores estimados e os dados observados, eliminando resíduos e tornando a reta a representação mais fiel dos conjuntos de dados disponíveis (Silva & De Mattos, 2017).

Tabela 6 – Valores de coeficientes de difusão em relação ao fator água/cimento.

Coef. Difusão (cm ² /s)	Água/cimento	Autor
1,50E-09	0,27	Pereira, 2001
2,00E-09	0,4	Rizzon et al., 2006
2,70E-09	0,45	Pereira, 2001
2,85E-09	0,5	Rizzon et al., 2006
3,31E-09	0,6	Rizzon et al., 2006
5,00E-09	0,75	Pereira, 2001

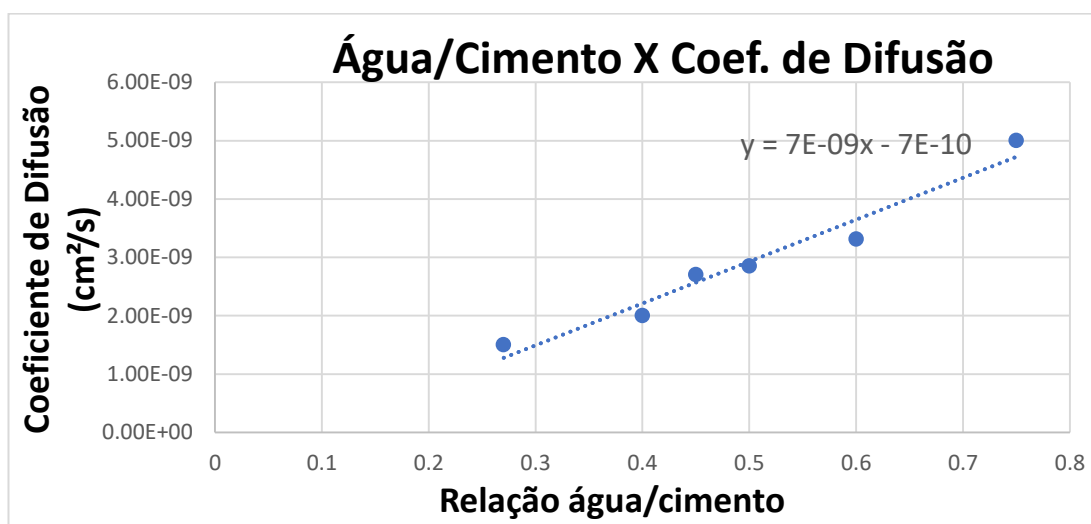


Figura 9 – Influência da relação água/cimento no valor do coeficiente de difusão.

$$D_c = 7 \times 10^{-9} \times a/c - 7 \times 10^{-10} \quad (4)$$

Onde:

- a/c , relação água cimento.

Outro parâmetro que tem influência relevante na previsão do início da corrosão é a quantidade de cloreto inicialmente depositado na superfície do concreto. Isto depende principalmente da agressividade do meio onde a estrutura está inserida, que define a quantidade de íons cloretos livres, e também das propriedades do concreto. No presente trabalho, considera-se que a quantidade

inicial de cloreto no concreto é igual a zero e que seu ingresso ocorre apenas devido à agressividade do meio externo.

Guimarães et al. (2015) obtiveram o teor de cloreto nas camadas mais externas do concreto em função da distância da costa. Os seus resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade de cloreto em relação à distância até a costa.

Distância da costa (m)	C (%)
0	3,1
160	1,1
630	0,6

É importante ressaltar que os íons de cloreto não são provenientes apenas de atmosferas marinhas, mas também de áreas industriais, solos salinos e ainda oriundos de sais de degelo (Alonso et al., 2000). Neste trabalho, além de ambiente marinho, foram pesquisados na literatura valores de concentração de cloretos para ambientes industriais, que são muito comuns em regiões metropolitanas, onde existe um grande número de pontes, viadutos dentre outras estruturas sujeitas à penetração desses íons. De acordo com Helene (1993), os teores de cloretos de referência são classificados conforme o ambiente na qual eles se encontram. Durante seu estudo, ele caracterizou atmosferas marinhas com a mesma classe de agressividade que as atmosferas industriais. Diante disso, o presente trabalho considera também ambientes industriais, para os quais serão atribuídos os mesmos valores apresentados na Tabela 6.

Além disso, foram pesquisados estudos que tratassem da sobreposição desses ambientes, em casos em que existe uma grande malha industrial na costa, porém não foram encontradas referências na literatura que consideram estes casos. Dessa forma, o limite máximo de 3,1% de concentração de cloreto para ambientes agressivos é considerado neste trabalho.

Outro parâmetro importante a ser discutido é a concentração limite de cloreto (C_{cr}), que define a concentração limite que atinge a superfície da armadura, ocorrendo a despassivação e iniciando o processo corrosivo das barras de aço. Os valores para esse parâmetro encontrados na literatura estão presentes na Tabela 8. Vale ressaltar que o valor da NBR 6118 de 0,05% de concentração de cloreto foi encontrado em referência à norma brasileira antiga, visto que a

norma atual não fixa valor limite e sim descreve como o ingresso desses íons pode ser evitado. Como esse valor de 0,05% já foi citado na norma brasileira e é utilizado pelo comitê euro-internacional de concreto, além de ser o valor mais conservador dentre os utilizados, este é adotado neste trabalho.

Tabela 8 – Quantidade limite de cloretos (Helene, 1993).

	Norma	Valor (%)
Brasil	NBR 6118	0,05
Estados Unidos	ACI 318	0,15
Europa	CEB	0,05
Espanha	EH - 88	0,4

O valor adotado acima se refere à quantidade limite de cloreto para a despassivação das armaduras de aço carbono convencionais, como o CA 50, amplamente utilizado na indústria da construção civil no Brasil. Porém, mundialmente já tem se aplicado o uso de outros tipos de aço, tais como os inoxidáveis, que apresentam um valor limite muito superior aos limites das armaduras de aço carbono, chegando a um valor dez vezes maior (Markeset, 2008).

As armaduras de aço inoxidável apresentam uma maior resistência à corrosão devido ao uso de óxido de cromo na película protetora das barras de aço. Isso se deve porque o processo da passividade ocorre de forma dinâmica e esse filme protetor, quando nas condições corretas de uso, é auto reparável. Dessa forma, o tempo de proteção das armaduras é prolongado garantindo um aumento no tempo de vida útil (Markeset, 2008).

O maior valor de concentração limite de cloreto de armaduras de aço inoxidável resulta em um considerável aumento no tempo de vida útil das armaduras quando comparadas as armaduras convencionais. É importante observar que, o uso de armaduras inox vem crescendo significativamente no mundo, mais precisamente nos países europeus, onde a utilização frequente de saís de degelo aumenta ainda mais a incidência de íons de cloreto.

Apesar de possuir esse contexto teórico e ideal quanto à sua utilização, ainda existe uma grande limitação para tal, pois o seu custo em relação aos materiais convencionais ainda é muito elevado. Segundo Skovsgaard (2000), o valor pode ser de 5 a 8 vezes maior em relação ao aço carbono e dessa forma é necessário um estudo de viabilidade específico para a sua utilização.

Uma aplicação prática que demonstra a diferença de vida útil com a utilização de armaduras convencionais e com armaduras de aço inoxidável é exemplificado na construção de dois piers na cidade de Progreso no México. Um deles construído em 1941, com 2100 metros de comprimento, de concreto armado com aço inoxidável e o outro construído em 1972, também de concreto e armado com armaduras de aço carbono (Dahlstrom et al., 2018).

Como se pode observar na Figura 10, o píer construído com armaduras convencionais, 31 anos depois, está quase que completamente extinto, restando apenas alguns pilares. Já o outro, na direita da Figura 10, construído em aço inox, apresenta-se em completo estado de conservação, e sendo utilizado até hoje sem apresentar nenhum dano estrutural. A foto apresentada foi registrada em 2018.



Figura 10 - Destroços do píer construído com concreto armado com barras de aço carbono em 1973 e ao fundo o Pier Progreso construído em 1941 com concreto armado com barras de aço inoxidável (Nickel Institute, 2018).

3.2.2. Impactos decorrentes da degradação precoce de estruturas

Com o intuito de proporcionar uma forma preliminar de avaliar os impactos ambientais, sociais e econômicos causados devido à paralização e possivelmente à recuperação de uma ponte, foi desenvolvido um método para se calcular índices para auxiliar nas tomadas de decisão, quando há o intuito de melhorar a qualidade e durabilidade de pontes e viadutos.

Os modelos numéricos utilizados nessa pesquisa, para mensurar os impactos decorrentes da paralização de determinada estrutura foram os propostos por Stein (2004) e por Sabatino et al. (2017).

Para a obtenção do custo devido ao tempo extra dos usuários ocasionados por maiores rotas foi utilizada a Equação 5, proposta por Stein (2004).

$$I1 = C2 * O * \left(1 - \frac{T}{100}\right) + C3 * \left(\frac{T}{100}\right) * \left(Cdesv * ADT * \frac{N}{vm}\right) \quad (5)$$

Onde:

- $C3$, custo operacional de um caminhão incluindo cargas (Dólar EUA);
- O , Taxa de ocupação do veículo (Número de usuários);
- T , porcentagem de caminhões que transitam a ponte (%);
- $C3$, custo operacional de um veículo de passeio (Dólar EUA);
- C_{desv} , comprimento total do desvio (Km);
- ADT , Média do tráfego diário (Número de veículos);
- N , tempo de paralização (Dias);
- Média de velocidade no desvio (Km/h).

O custo operacional dos veículos pode ser obtido pela Equação 6 também proposta por Stein (2004).

$$I2 = C1 * Cdesv * ADT * N \quad (6)$$

Onde:

- $I2$, custo operacional total do veículo devido a sua utilização;
- $C1$, custo operacional do veículo devido a utilização por km (Dólar EUA/km).

O modelo para a determinação do custo devido a reconstrução de pontes foi proposto por Sabatino et al. (2017) e é apresentado na Equação 7.

$$I3 = \frac{C4 * Cp * Lp}{\left(1 + \frac{rm}{100}\right)^t} \quad (7)$$

Onde:

- $C4$, custo para reconstrução de uma ponte (Dólar EUA/m²)

- C_p , comprimento da ponte (m);
- L_p , largura da ponte (m);
- R_m , inflação (%)
- t , tempo de vida útil estimado (Anos).

Por fim, para mensurar o impacto ambiental decorrente a emissão de CO_2 emitido devido a produção de material para reconstrução de uma estrutura, e também devido a operação dos veículos por rotas alternativas, foi utilizado o modelo proposto por Sabatino et al. (2017).

A quantidade de CO_2 emitido devido a produção de materiais pode ser obtida através da Equação 8.

$$I4 = Ec * Vc + Ea * Va \quad (8)$$

Onde:

- E_c , quantidade de CO_2 para a produção de concreto (kg CO_2/m^3);
- V_c , volume de concreto necessário para reconstrução (m^3);
- E_a , quantidade de CO_2 para a produção de aço (kg CO_2/m^3);
- V_a , volume de aço necessário para reconstrução (m^3).

A quantidade de CO_2 emitido devido à operação dos veículos em rotas alternativas, na qual possuem uma distância muito superior ao de uma ponte, pode ser obtido utilizando a Equação 9.

$$I5 = N * Cdesv * ADT * (E_{vei} * \left(1 - \frac{T}{100}\right) + E_{cam} * \left(\frac{T}{100}\right)) \quad (9)$$

Onde:

- E_{vei} , Emissão de CO_2 devido a operação de veículos de passeio (Kg CO_2/km);
- E_{cam} , Emissão de CO_2 devido a operação de caminhões (Kg CO_2/km).

A partir desta pesquisa foram determinados quais dados de entrada são necessários para uma avaliação preliminar destes impactos, sendo que o impacto ambiental foi estimado através da quantidade de CO_2 emitido devido à interrupção da operação e reconstrução da estrutura. A Tabela 9 resume os dados que foram selecionados para essas avaliações.

Tabela 9 – Dados de entrada para avaliação preliminar dos impactos financeiros e ambientais.

Dados de Entrada		
Variável	Descrição da variável	Unidades
Cp	Comprimento da ponte	m
Cdesv	Comprimento do desvio	km
Lp	Largura da Ponte	m
rm	Inflação	%
t	Tempo para possível falha	anos
N	Número de dias de paralização	dias
ADT	Média do tráfego diário	Nº. de veículos
vm	Velocidade média no desvio	km/h
Vc	Volume de concreto	m ³
Va	Volume de aço	m ³

Algumas variáveis importantes tem um valor fixo, conforme observado no estudo da literatura. Os valores adotados para essas variáveis são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros fixos encontrados na literatura.

Dados fixados			
Variável	Nome da variável	Valor	Unidade
C1	Custo operacional devido à utilização	0,22	Dólar EUA
C2	Custo operacional de um caminhão incluindo cargas	28,69	Dólar EUA
C3	Custo operacional de um veículo de passeio	9,92	Dólar EUA
C4	Custo para a construção de 1m ² de ponte	884,4	Dólar EUA
Evei	Emissão de CO2 de veículos de passeio	0,14	Kg CO2/km
Ecam	Emissão de CO2 de caminhões	1,5	Kg CO2/km
Ea	Emissão de CO2 devido à produção de aço	12919	kg CO2/m ³
Ec	Emissão de CO2 devido à produção de concreto	533	kg CO2/m ³

Os valores fixos apresentados na Tabela 10 são os valores mais atualizados encontrados na literatura, porém não são todos referentes ao mesmo ano e nem referente ao ano corrente.

Os custos operacionais de caminhões e veículos de passeio, assim como o custo para reconstrução de um m² de ponte foram encontrados no trabalho realizado por Stein (2004).

Como sugestão de atualização dos dados, foi analisado o valor do salário mínimo em 2004 nos Estados Unidos, que segundo o Departamento Trabalhista dos Estados Unidos era de 5,15 dólares/hora. Considerando que esse crescimento foi linear entre 2004 e 2019, pode-se atribuir tal linearidade ao valor dos custos operacionais dos veículos e no valor de reconstrução do metro quadrado de pontes. Esse aumento foi estimado em 36,9%. A Tabela 11 apresenta os dados utilizados de 2004 e os valores corrigidos para 2019 (Mock, 2020).

Tabela 11 – Custos operacionais de veículos e de reconstrução de pontes em 2004 e corrigidos para 2019.

	(2004)	(2019)	Unidade
Custo operacional veículos de passeio	7,05	9,92	Dólar EUA/hora
Custo operacional de caminhões	20,56	28,69	Dólar EUA/hora
Custo de reconstrução de pontes	646	884,37	Dólar EUA/m ²

Para os valores da quantidade da quantidade de CO₂ emitidos por veículos de passeio e caminhões foram encontrados valores distintos para cada país, porém muito próximos. No Brasil, segundo o *Ranking de veículos em emissões de CO₂ por km rodado* (2012), realizado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA), o valor foi estimado em 0,15 kgCO₂/km. Por outro lado, o Conselho Internacional de Transporte Europeu, o valor é de aproximadamente 0,13 kgCO₂/km no ano de 2015 (Mock, 2020). Já o Conselho de Transporte Americano estimou o valor em 0,14 kgCO₂/km. Diante disso, foi utilizado o valor encontrado para os Estados Unidos, visto que todos os outros valores utilizados são referentes a esse país.

Ainda de acordo com o Conselho Internacional de Transporte Europeu, o valor atribuído para caminhões e outros veículos pesados é em média 1,3 kgCO₂/km. Vale ainda ressaltar que segundo Progress & Been (2017), demonstrou que a frota de caminhões dos EUA possui uma emissão de CO₂ superior a 16% em relação à frota europeia, demonstrando que o valor americano pode ser estimado em aproximadamente 1,5 kgCO₂/km.

Por fim, os dois últimos valores apresentados na Tabela 9, representam a quantidade de CO₂ emitido para a produção de matérias primas utilizada na

construção civil. Os valores estimados de 12.919 kgCO₂/m³ para o aço e 533 kgCO₂/m³ para o concreto, foram obtidos considerando extração, processamento e transporte, além de considerar as perdas durante todos os processos (Luis & Carvalho, 2012). Vale ressaltar que esses dois últimos dados foram retirados de trabalhos realizados no Brasil, pois não foram encontrados dados referentes aos EUA, que considerasse todo o processo tais como extração, processamento, transporte e perdas.

4

Estudo de caso

Este capítulo apresenta um estudo de caso que utiliza uma ponte na Orla Norte da Cidade de Porto Seguro/BA. São apresentadas as patologias encontradas na estrutura através de registros fotográficos obtidos em visita técnica no local. Além disso, são apresentadas propostas de melhorias que poderiam ser consideradas ainda em fase de projeto, utilizando o mapa de processos proposto no capítulo anterior. São também apresentados cenários diferenciados nas especificações de projeto e a partir disso serão tiradas conclusões a respeito da estrutura estudada.

4.1. Contexto

A ponte Rio da Vila encontra-se localizada na rodovia estadual BA 001, na Orla Norte de Porto Seguro/BA, principal acesso a região praiana da cidade. A ponte tem aproximadamente 15 metros de comprimento e largura de 10 metros, possuindo duas faixas de rolamento. Na Figura 11 são apresentadas as faixas de rolamento e uma visão geral da ponte.



Figura 11 – Faixas de rolamento da Ponte Rio da Vila.

Vale salientar que não foi possível a obtenção do projeto da ponte. Diante disso, todas as especificações de projetos foram coletadas durante visitas técnicas. Além disso, durante uma conversa informal com o secretário de infraestrutura da cidade, foi informado que a ponte possui uma idade por volta de 23 anos e que em 2018 a estrutura da ponte passou por uma recuperação, pois seu tabuleiro cedeu em torno de 10 cm e dessa forma foi necessário desviar a principal rota de acesso às praias da cidade.

O estudo de caso recebeu sua concepção estrutural em concreto armado, composta por um tabuleiro, duas vigas de seção retangular (longarinas), quatro pilares de seção hexagonal e três transversinas de seção transversal retangular. Uma visão geral da subestrutura da ponte pode ser vista na Figura 12.



Figura 12 – Concepção estrutural da Ponte em estudo.

Na Tabela 12 estão apresentadas as dimensões de cada elemento estrutural.

Tabela 12 – Dimensão dos elementos estruturais da ponte.

Dimensão elementos estruturais			
	Altura (m)	Largura (m)	Comprimento (m)
Tabuleiro	0,40	10	15
Vigas (Longarinas)	1	0,40	17
Transversinas	1	0,30	6,5
Pilares	3,5	0,75	0,75

Vale ressaltar ainda, que a ponte suporta um alto fluxo de veículos durante todo o ano e, além disso, a cidade de Porto Seguro possui uma grande população

flutuante em determinadas épocas do ano, acarretando congestionamentos intensos sobre a estrutura em estudo. Vale também pontuar que a ponte está alocada em um ambiente muito agressivo, estando essa em frente ao mar e recebendo influência direta da maré em seus pilares e de maresia em toda sua estrutura.

4.2.

Principais patologias encontradas na estrutura

4.2.1.

Inspeção visual dos elementos estruturais

A inspeção visual teve como objetivo identificar as patologias presentes na estrutura e dessa forma caracterizar os cenários de melhorias que pudessem evitar tais problemas.

As patologias identificadas foram todas feitas a olho nu, utilizando um aparelho de celular para obtenção das imagens.

4.2.2.

Pilares

Um dos problemas encontrados nos pilares foi o cobrimento insuficiente. Foram encontrados valores de 1 cm e no máximo de aproximadamente 2 cm, sendo que alguns pontos o cobrimento era praticamente inexistente, como se pode perceber na Figura 13. Vale salientar que a NBR 6118:2014 sugere um cobrimento mínimo de quatro cm para estruturas em ambientes agressivos como a apresentada.



Figura 13 – Pilar com cobrimento quase inexistente.

Na Figura 14 podemos perceber outros problemas como corrosão das armaduras e deslocamento do concreto, deixando a estrutura ainda mais exposta à ação de agentes oxidantes.



Figura 14 - Pilar com armaduras em processo de corrosão; Deslocamento do concreto.

4.2.3. Vigas (Longarinas e Transversinas)

Nas vigas principais (longarinas), foram encontradas patologias em estágio avançado de deterioração. A Figura 15 apresenta a longarina principal com problemas de corrosão das armaduras, cobrimento insuficientes, deslocamento e principalmente, exposição das armaduras em um ambiente muito agressivo.



Figura 15 – Longarina com armaduras expostas em processo de corrosão avançada; cobrimento insuficiente e deslocamento do concreto.

Na Figura 16 pode-se ver em detalhe o processo corrosivo, a ausência do cobrimento devido ao deslocamento do concreto, comprometendo ainda mais o desempenho da estrutura. Pode-se também perceber regiões em que o cobrimento inicial era insuficiente devido a especificações de projeto ou problemas na execução.



Figura 16 – Detalhe do processo corrosivo e exposição das armaduras da longarina.

Na Figura 17 pode-se visualizas as transversinas com presença de corrosão acentuada, deslocamento do concreto, armaduras expostas e manchas escuras decorrentes da proliferação de microrganismos devido à humidade do ambiente.



Figura 17 – Transversinas com presença de corrosão acentuada; deslocamento do concreto; armaduras expostas e manchas escuras de umidade.

4.2.4. Tabuleiro

No tabuleiro foram encontrados problemas pontuais e amenos de corrosão, principalmente nas partes mais próximas das bordas onde a infiltração de água é mais intensa, acarretando também manchas escuras de infiltração como pode se observar na Figura 18.



Figura 18 – Processo de corrosão pontual e manchas de infiltração no tabuleiro.

Além disso, na Figura 19, podem-se notar nichos de concretagem nas bordas do tabuleiro, erro comum nas fases de execução de estruturas. Ainda podem-se notar problemas nos tubos de drenagem da ponte, acarretando

problemas de infiltração e logo acelerando o processo de degradação por corrosão.



Figura 19 – Nichos de concretagem e problemas de drenagem superficial da ponte.

4.2.5. Aparelhos de apoio

Em geral os aparelhos de apoio mostraram-se muito degradados, com muita variação de espessura como se pode notar na Figura 20.



Figura 20 – Aparelho de apoio com espessura inadequada e variável.

Outro problema encontrado foi inexistência ou completa degradação do aparelho de apoio em um dos pilares. Devido a isso, pode-se perceber na Figura

21, que o topo do pilar está sofrendo tensões excessivas causando deslocamento do concreto.



Figura 21 – Aparelho de apoio praticamente inexistente.

Vale ainda ressaltar que outros diversos problemas foram encontrados na estrutura, principalmente devido à falta de gerenciamento de informações ainda em fase de projeto. Um deles é a construção de um anexo como passagem de pedestres, que é uma estrutura metálica apoiada na pré-existente, que também encontra-se bastante degradada, como pode ser visto na Figura 22.



Figura 22 – Estrutura metálica para apoio de passarela anexa a ponte.

Na Tabela 13, estão compilados problemas encontrados, assim como sua possível solução ainda em fase de projeto, exibindo também em qual momento tais questões deveriam ser consideradas no mapa de processos proposto, auxiliando uma melhor estruturação na tomada de decisão. Vale salientar que o fluxo de trabalho proposto leva em consideração a tomada de decisões em fase

de elaboração de projeto, e não em relação a um plano de manutenção para a estrutura em estudo. As considerações de melhorias no presente estudo de caso, evidenciam cenários que poderiam ter sido executadas quando a estrutura estava sendo projetada.

Tabela 13 – Patologias encontradas na estrutura assim como possíveis melhorias e sua respectiva fase no IDM proposto.

Problema	Solução	Fase no IDM
Infiltrações e nichos de concretagem.	(1) Melhoria na qualidade do concreto (2) Planejamento e controle da concretagem	Figura 23
Corrosão das armaduras	(1) Aumento da espessura do cobrimento; (2) Utilização de materiais alternativos como, armaduras de aço inoxidável; (3) Melhoria na qualidade/porosidade do concreto, alterando a relação água/cimento.	Figura 23
Aparelhos de apoio ineficientes	(1) Manutenções e previsão de acessibilidade para as manutenções	Figura 24
Posição da estrutura	(1) Estudo de viabilidade para o posicionamento dos elementos estruturais, assim como forma e dimensão.	Figura 25

A Figura 23 a seguir demonstra a fase do IDM na qual ocorre a análise da viabilidade em considerar determinadas melhorias na estrutura tais como: Aumentar cobrimento, diminuir relação água cimento e alterar o tipo de armadura a ser usada. Dessa forma é possível determinar o tempo para início da corrosão, os custos de realizar tal melhoria e definir os impactos causados devido à degradação. A análise feita nesse momento deve ser acompanhada pelo gerente de projetos juntamente com a equipe de engenheiros estruturais, dessa forma obtendo um resultado que garanta uma melhor durabilidade e desempenho da ponte.

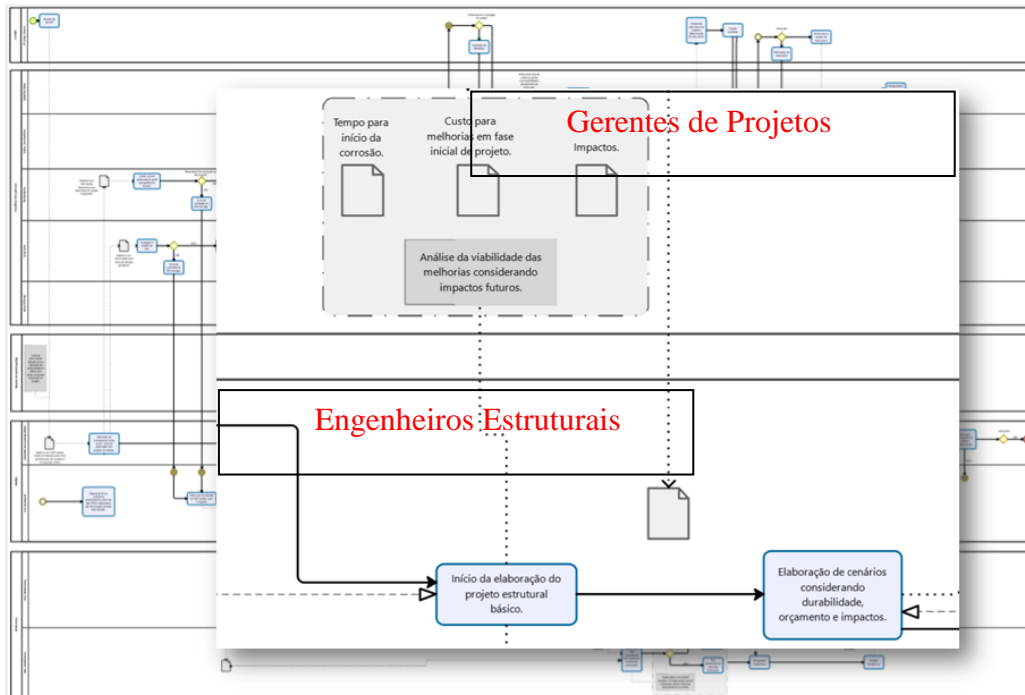


Figura 23 – Fase do IDM na qual ocorre o estudo de viabilidade para melhorias nas especificações de projeto.

Na Figura 24, a fase de análise de acessibilidade de manutenção ocorre nesse momento no mapa de processos proposto, visto que o arquiteto, na elaboração do seu projeto conceitual, juntamente com a equipe de estrutura e o gerente de projetos, inclui no projeto os elementos essenciais na estrutura. Vale salientar que nesse momento, uma consideração de acessibilidade para manutenção torna o projeto mais caro, porém a longo prazo uma impossibilidade de troca de determinado aparelho de apoio pode acarretar uma degradação acelerada da estrutura, como pode ser visto na Figura 21 anteriormente apresentada, gerando custos muito elevados tanto para o reparo, quanto devido a uma possível interrupção do fluxo na ponte.

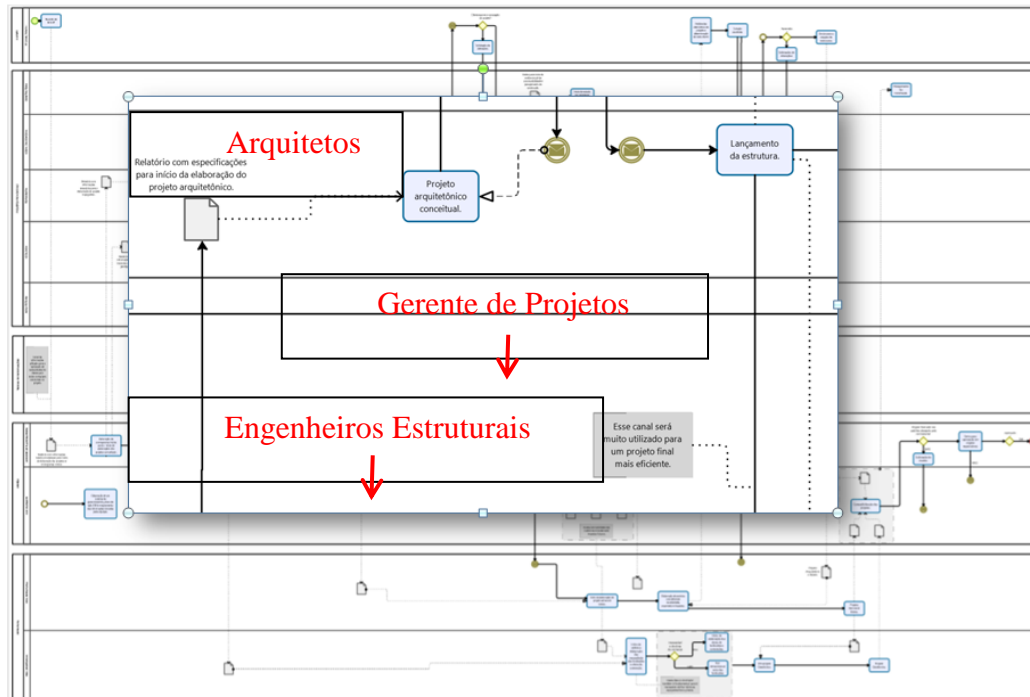


Figura 24 – Fase do IDM na qual se deve considerar a acessibilidade para manutenções. Arquiteto deve incluir tais especificações em seu projeto.

A Figura 25 explicita a fase do IDM em que os engenheiros de rodovias recebem o projeto topográfico que é usado para desenvolver o projeto geométrico da via. Nessa fase é possível fazer uma análise mais profunda a respeito da posição da estrutura, visto que no presente estudo de caso percebeu-se que os elementos estruturais que ficam com face diretamente voltada para a direção dos ventos proveniente do mar sofrem uma corrosão muito maior do que os demais. De certa forma é um resultado esperado, e por esse motivo um estudo para otimizar a posição da ponte de forma, que reduza a superfície de contato que sofre ação direta dessa intempérie, aumentaria o tempo de vida útil de determinados elementos estruturais da estrutura.

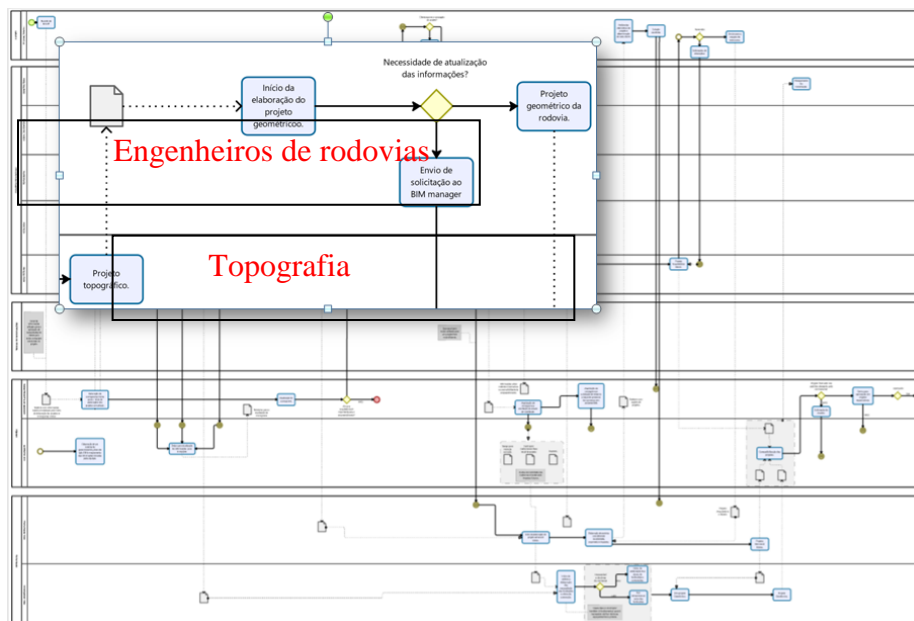


Figura 25 – Fase do IDM na qual se deve desenvolver o projeto geométrico considerando também o posicionamento mais viável da estrutura.

4.3. Cenários e metodologia para previsões

Nessa seção são apresentados cinco cenários para análise da previsão do tempo de início da corrosão relacionados às melhorias propostas em cada cenário assim como o custo relacionado às mesmas.

- Cenário 00

O cenário 00 é o que apresenta a estrutura sem nenhuma alteração ou melhoria e com as especificações medidas em loco. Os cobrimentos encontrados variaram de 10 mm a 20 mm e dessa forma foi utilizado um valor médio como o cobrimento da estrutura para o presente estudo de caso. A armadura utilizada é armadura convencional de aço carbono, e o fator água cimento não é conhecido, sendo considerado de 0,5 para o presente cenário. Vale ressaltar que as especificações desse cenário serão consideradas como base para as comparações realizadas com os demais cenários.

- Cenário 01

Esse cenário contempla uma melhoria na espessura do cobrimento, considerando o valor mínimo sugerido pela NBR 6118:2014 de 40 mm para ambientes agressivos, que corresponde ao ambiente da estrutura em estudo.

Nesse caso foi mantido o tipo de armadura e a relação água/cimento. Como esse cenário apresenta valores mínimos sugeridos pela norma vigente para estruturas de concreto, ele também será considerado como base para algumas comparações.

- Cenário 02

No cenário 02 foi considerada uma melhoria tanto na relação água cimento quando no tipo da armadura. Um cobrimento de 40 mm e a utilização de armadura de aço inox nos locais críticos da estrutura foi aplicado para análise desse caso, mantendo a relação água/cimento em 0,5. Para o caso em estudo, a estrutura apresentou aproximadamente 50% dos seus elementos estruturais em estágio avançado de degradação. Esse valor foi obtido contabilizando o total de elementos em relação ao número de elementos que apresentaram processo patológico grave.

- Cenário 03

Nesse caso foi analisado o comportamento na alteração da relação água/cimento. Dessa forma, foi mantido um cobrimento de 40 mm e utilização de armaduras convencionais.

- Cenário 04

No cenário 04 foi considerado um aumento na espessura do cobrimento, sendo essa superior ao mínimo exigido pela NBR 6118:2014. O valor utilizado foi de 50 mm, sendo esse um valor 25% superior ao valor mínimo sugerido pela norma.

Para a análise dos cenários propostos foi utilizado o aplicativo desenvolvido para a previsão dos tempos de início da corrosão e também para a estimativa de custos. O modelo utilizado para o cálculo da previsão do tempo de início da corrosão foi o proposto por Thoft-Christensen et al. (1996), apresentado no capítulo 3 do presente trabalho.

Para o cálculo do aumento percentual no custo devido à variação do cobrimento, foi utilizada a variação no volume de concreto considerando as seções selecionadas pelo usuário. Vale ainda ressaltar que para a previsão, foram utilizadas como opções ao usuário, seções mais usuais para cada elemento estrutural. Seções retangulares e T para vigas, retangulares e circulares para pilares e apenas seção retangular para o tabuleiro, sendo essa considerada sempre plana e maciça.

Já para o percentual devido ao aumento devido à utilização de armaduras inoxidável, foi considerado um valor de cinco vezes mais em relação às armaduras convencionais, como encontrado na literatura e já apresentado anteriormente no capítulo 3.

A Figura 26 a seguir apresenta a interface do aplicativo desenvolvido para o cálculo das previsões no software Matlab. Na Figura 18, podem-se observar os dados de entrada como cobertura (mm), fator água/cimento e distância em relação à costa marinha (km), obtendo como saída o tempo de início da corrosão (anos) para armaduras convencionais e para armaduras de aço inoxidável. Além disso, na lateral direita da figura, é possível selecionar o tipo de seção do elemento estrutural e a quantidade desse mesmo elemento na estrutura. Além disso, devem-se inserir as dimensões dos elementos estruturais, todas em metros. Os dados de saída são os percentuais de aumento dos custos parciais para cada elemento e por fim o aumento do custo global das melhorias realizadas em toda a estrutura, considerando nesse aplicativo, apenas o custo devido à variação do cobertura.

Corrosão



Dados de entrada:

Cobrimento: mm

Fator Água/Cimento:

Distância em relação à costa marinha ou ambiente industrial: Km

Dados de saída:

Tempo para início da corrosão (Arm. Convencional): Anos

Tempo para início da corrosão (Arm. Inoxidável): Anos

Calcular

Viga

Seção Transversal: Retangular

Altura [m]	1
Base [m]	0.4
Compri...	17

Número de Vigas:

Percentual do aumento no custo parcial:



Pilar

Seção Transversal: Circular

raio [m]	0.35
altura [m]	3.5

Número de pilares:

Percentual de aumento no custo parcial:



Laje

a [m]	10
b [m]	15
espessu...	0.4

Número de lajes:

Percentual do aumento no custo parcial:



Percentual do aumento no custo total

Figura 26 – Interface gráfica do aplicativo.

5 Resultados e Discussão dos resultados

O primeiro resultado que foi obtido é o tempo de início da corrosão nas estruturas devido à variação das especificações de projeto. Na Tabela 14 são apresentadas as melhorias com suas respectivas previsões.

Tabela 14 – Resultados da previsão para o tempo de início da corrosão baseado nos cenários especificados.

Cenário	Especificações	Tempo de início da corrosão
0	Cobrimento: 15 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,5	2,1 anos
1	Cobrimento: 40 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,5	14,6 anos
2	Cobrimento: 40 mm Armadura Aço Inoxidável Fator água cimento: 0,5	39,8 anos
3	Cobrimento: 40 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,45	16,5 anos
4	Cobrimento: 50 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,5	22,8 anos

Pode-se notar que um cobrimento insuficiente pode acarretar em uma redução drástica no tempo de vida útil da estrutura, visto que a única variação realizada entre o cenário 00 e 01 foi a adequação da estrutura para um cobrimento mínimo sugerido pela norma vigente de estruturas de concreto. Um aumento de 25 mm no cobrimento prolongou em 12,5 anos o tempo de vida útil da estrutura, representando um aumento de aproximadamente 600% no tempo de vida útil.

No cenário 02 foi considerada a utilização de armaduras de aço inoxidável em regiões críticas da estrutura, ou seja, nas que apresentam gravidade no processo de corrosão. Mantendo o cobrimento e o fator água cimento fixos em

relação ao cenário 01, foi obtido um aumento de 25,2 anos no tempo para início do processo corrosivo das armaduras, representando um aumento de 172% no tempo de vida útil da estrutura. Além disso, um aumento de 37,7 anos em relação ao cenário 01, considerando um acúmulo de efeitos entre cobrimento e utilização de materiais alternativos para armação do concreto.

O cenário 03 contempla a variação do valor da relação água/cimento. Uma redução dessa relação de 0,5 para 0,45, valor sugerido pela NBR 6118:2014 para ambientes muito agressivos, acarreta um prolongamento de aproximadamente 2 anos no tempo de início da corrosão em relação ao cenário 01, evidenciando que apesar de ter impacto positivo no tempo de vida útil das estruturas de concreto, a relação água/cimento não é um critério tão importante quanto o cobrimento e o tipo de armadura utilizado.

No cenário 04, um aumento do cobrimento de 10 mm em relação ao cenário 01, resultando em um cobrimento de 50 mm, valor sugerido pela NBR 6118:2014 para ambientes muito agressivos, acarretou um aumento de 8,2 anos para o início do processo corrosivo. Isso significa que um aumento de 25% na espessura do cobrimento, acarreta um aumento de quase 60% no tempo de vida útil da estrutura.

A partir desses cenários, foi também obtido o aumento percentual no custo de material utilizado para realizar tais melhorias, e dessa forma obtendo outro parâmetro para uma tomada de decisão mais assertiva nas fases conceituais de projeto. Na Tabela 15 são apresentados os aumentos percentuais relacionados às melhorias relacionadas em cada cenário.

Tabela 15 – Aumento percentual dos custos relacionados às melhorias dos especificações de projeto.

Cenário	Especificações	Custo de material por elemento estrutural (%)	Custo Global (%)
00	Cobrimento: 15 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,5	-	
01	Cobrimento: 40 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,5	Viga - 17,8 Pilar - 13,9 Tabuleiro - 13,3	14,10
02	Cobrimento: 40 mm Armadura Aço Inoxidável Fator água cimento: 0,5	Viga - 218 Pilar - 214	215

03	Cobrimento: 40 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,4	Não contemplado no escopo da pesquisa	-
04	Cobrimento: 50 mm Armadura Convencional Fator água cimento: 0,5	Viga - 24,9 Pilar - 18,8 Tabuleiro - 18,7	19,8

Além disso, foram também quantificados os impactos sociais, econômicos e ambientais decorrentes de uma possível paralização da estrutura em estudo, devido a necessidades de manutenção corretiva. Para tal quantificação foram utilizados os modelos matemáticos propostos por Stein (2004) e Sabatino et al. (2015) como apresentado no capítulo 3 deste trabalho.

Para mensurar os impactos devido à paralização da estrutura, foi necessário a definição de algumas variáveis fixas, apresentadas na Tabela 10 do capítulo 03, e as variáveis que representam a realidade específica da ponte em estudo, tais como a distância da rota alternativa, a porcentagem de caminhões no percurso, dimensões dos elementos estruturais, tráfego diário médio, número de dias de paralização, velocidade média no desvio, tempo de vida útil projetado, volume de material utilizado e a inflação do país.

Como dito anteriormente, a ponte em estudo está localizada no principal acesso a orla principal da cidade de Porto Seguro e logo possui uma função primordial para a mobilidade da cidade, principalmente por se tratar de uma região predominantemente turística.

Considerando a paralização da ponte, o desvio que deve ser percorrido devido a tal interrupção é de 20,1 quilômetros, apresentando uma velocidade média permitida de 60 km/h, considerado a partir do centro da cidade. Além disso, segundo levantamento pela prefeitura de Porto Seguro, o tráfego diário médio na orla é de aproximadamente 4000 carros, levando em consideração alta e baixa temporada da cidade. Além disso, em conversa realizada com o secretário de obras da cidade, foi informado que aproximadamente 25% desse fluxo é composto por ônibus e caminhões. Vale ressaltar que esses valores foram obtidos em uma conversa informal com o secretário de obras e esses dados foram os estimados em 2018 quando a ponte foi interditada devido a problemas estruturais.

Para o estudo de caso foi considerada uma paralização de aproximadamente 20 dias, referente também ao tempo de interdição ocorrido no reparo realizado em 2018. O comprimento da ponte é de 15 metros e sua largura de aproximadamente 10 metros. Além disso, o volume de concreto e aço foram estimados em aproximadamente 78 m³ e 3 m³ respectivamente. A estimativa do volume foi feita considerando as dimensões dos elementos estruturais. Porém, vale salientar que em um ambiente BIM, em que existe um modelo com elementos e materiais parametrizados, é possível a obtenção exata da quantidade de material utilizada na estrutura, o que torna ainda mais assertiva as previsões. Para tornarem os cálculos ainda mais reais, ainda foi feita uma correção inflacionária, considerando a inflação em 4,31%, referente ao ano de 2019 e obtido pelo *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019)*.

A Tabela 16 a seguir, apresenta a interface da planilha utilizada para quantificar os impactos gerados devido a uma paralização.

Tabela 16 – Impactos associados a paralização da ponte em estudo.

Dados de Entrada		Unidade
C1	0,22	Dólar EUA
C2	10,92	Dólar EUA
C3	28,69	Dólar EUA
C4	884,37	Dólar EUA
O	1,56	Nº. de pessoas
T	20	%
Cdesv	20,1	km
Lp	10	m
Cp	15	m
ADT	4000	Nº. de veículos
N	20	dias
vm	60	km/h
rm	4,31	%
t	30	anos
Ec	533	kg CO2/m ³
Ea	12919	kg CO2/m ³
vc	78	m ³
va	3	m ³
Evei	0,14	Kg CO2/km
Ecam	1,5	Kg CO2/km
Impactos		
Custo operacional devido ao tempo no desvio (Dólar EUA)		576.669,27

Custo operacional devido ao desgaste do veículo (Dólar EUA)	353.760,00
Custo devido a reconstrução da ponte (Material) (Dólar EUA)	37.406,48
Impacto devido a operação dos veículos no desvio (kg CO2)	662.496,00
Impacto devido a produção de material para reconstrução (kg CO2)	80.331,00
Impacto financeiro total	967.835,76
Impacto ambiental total	742.827,00

Dessa forma, pode-se observar um impacto de aproximadamente um milhão de dólares que é composto devido ao desgaste dos veículos, custo operacional devido a atraso dos usuários e também devido à reconstrução da estrutura. Vale ressaltar que tais impactos podem ser classificados tanto como econômicos quanto sociais, visto que afetam financeiramente a sociedade que utiliza a rodovia.

Ainda na Tabela 16, foi obtida a quantidade total de CO2 emitido, decorrente dessa paralização, chegando a aproximadamente 800 mil kg de dióxido de carbono emitido na atmosfera.

Diante disso, é possível perceber que uma interdição desta ponte pequena em um local de população média provocam impactos bastante significativos, tanto em questões econômicas quanto ambientais e sociais. Dessa forma, pode-se dizer que uma mudança nas metodologias e concepções a serem analisadas ainda nas fases iniciais de projeto, que garantam um prolongamento da vida útil deste tipo de estruturas, é fundamental para garantir a sustentabilidade do empreendimento.

Para comparar o custo de construção de uma ponte com especificações de projeto que garantam o seu tempo de vida útil e os custos gerados devido a sua paralização decorrente de uma possível paralização, foi feito uma estimativa do custo da construção da ponte em estudo baseado no valor proposto por Stein (2004), de aproximadamente 884 dólares americanos por metro quadrado, chegando a um valor total de 132.600 dólares americanos. Para isso foram utilizadas as dimensões da ponte real de 10 metros de largura por 15 metros de comprimento.

Considerando ainda que do total de 132.600 dólares, 40% é a porcentagem referente ao custo de materiais, chega-se a um total de 53.040 dólares. Considerando o cenário 01, na qual o cobrimento é de 40 mm acarretando um

aumento de 14,10% no total do orçamento de materiais, o valor passaria então de 53.040 dólares americanos para 60.518 dólares americanos.

No cenário 02, considerando armaduras inoxidável mais cobrimento de 40 mm, o aumento percentual total é de 215%. Vale ressaltar que esse aumento percentual é referente à utilização de armaduras inoxidáveis apenas na metade da estrutura, que representa a porcentagem de elementos em estágio avançado de degradação. Diante disso, o valor de 53.040 dólares americanos referente a materiais em geral, passaria a um valor de 167.076 dólares americanos.

Para o cenário 04, a espessura do cobrimento foi considerada de 50 mm, acarretando um aumento de 19,8% no custo dos materiais, alterando o valor final para 63.541,92 dólares americanos.

Dessa forma, pode-se concluir que no cenário 01 um aumento de 266% na espessura do cobrimento acarreta um aumento de custo de 14,10% e o valor total gasto com material na estrutura representa 6,25% do valor total gasto devido a paralização.

No cenário 02, pode-se concluir que o valor gasto inicialmente para a melhoria da estrutura, aumentando sua vida útil em 37,7 anos, representa 17,26% do valor total gasto devido a sua paralização, mostrando mais uma vez que melhorias em especificações de projeto em fases conceituais acarretam impactos positivos a longo prazo.

Por fim, no cenário 04, que considera a utilização de um cobrimento de 50 mm e logo um acréscimo de vida útil de 20,7 anos, o custo para tal melhoria representa 6,60% do valor gasto devido à paralização da ponte.

A partir disso, é possível perceber que melhorias em fase de projeto, apesar de acarretarem um aumento momentâneo nos custos do empreendimento, tornam-se mínimos quando comparados aos custos devido a reparos e manutenções corretivas devido a sua degradação. Pode-se observar também que o principal motivo da degradação precoce da estrutura nesse estudo de caso foi exatamente devido a especificações inadequadas e ineficientes no projeto.

6 Conclusões

A primeira conclusão do trabalho foi que a revisão estruturada da literatura (SLR – *Structure Literature Review*) conduziu e orientou na definição do escopo da pesquisa, mostrando as necessidades e lacunas a serem preenchidas na área de desenvolvimento de projetos de infraestrutura. Foi evidenciado também que a utilização do BIM para infraestrutura ainda é pouco abordada, principalmente quando comparada ao setor de edificações. Além disso, a SLR evidenciou que a indústria AEC apresenta uma grande dificuldade em se implementar novas tecnologias, principalmente devido ao conservadorismo ainda forte na área da construção civil. Por outro lado, a exigência por projetos mais sustentáveis e eficientes está cada vez maior, impulsionando a busca por novas técnicas e metodologias de projeto. Diante disso, foi possível perceber que apesar do conservadorismo ainda presente, a busca por novas tecnologias está presente, e é dessa forma que o BIM vem se destacando.

Em paralelo com as necessidades de novas metodologias, outro grande problema foi encontrado na revisão da literatura. A degradação avançada de grande parte dos empreendimentos de infraestrutura, principalmente pontes e viadutos, vêm causando preocupação às entidades administrativas. A SLR mostrou também que os impactos ambientais, econômicos e sociais são, por diversas vezes, avassaladores, como foi visto nos atuais acidentes ocorridos no Brasil em obras de infraestrutura.

Embora os trabalhos realizados não contemplem uma sinergia entre BIM, degradação de estruturas e sustentabilidade esta relação é potencialmente benéfica, visto que uma melhoria nas metodologias na elaboração de projetos juntamente com uma boa execução resulta em empreendimentos mais eficientes. É nesse contexto que o presente trabalho propôs essa sinergia através de um IDM, na qual um novo fluxo de trabalho na elaboração de projetos de infraestrutura foi desenvolvido. Nesse novo fluxo, previsões e análises de custos

foram utilizados para otimizar a tomada de decisão referentes às melhorias realizadas em estruturas de pontes.

O estudo de caso contemplou uma ponte na cidade de Porto Seguro/BA, na qual a partir de cenários com propostas distintas de melhorias, foi possível prever o tempo em que se iniciava a corrosão assim como os custos relacionados às respectivas melhorias. Além disso, os impactos foram mensurados, e dessa forma a tomada de decisões dentro no fluxo de trabalho proposto tornou-se potencialmente mais eficiente.

A partir da pesquisa chegou-se às seguintes conclusões:

- A consideração de melhorias em fases conceituais de projeto acarreta, além de um prolongamento de vida útil da estrutura, uma redução dos impactos econômicos quando considerado todo o ciclo de vida da estrutura;
- A previsão do tempo em que se inicia a degradação, juntamente com impactos e custos relacionados às melhorias no projeto são parâmetros que quando conhecidos, possibilitam uma tomada de decisões mais eficientes em termos da vida útil da ponte;
- A espessura do cobrimento foi um parâmetro que se mostrou sensível em relação ao tempo em que a corrosão se inicia. Além disso, um aumento nessa espessura não resultou em uma oneração do orçamento, visto que o aumento do custo foi irrisório em relação ao orçamento completo. Por outro lado, a relação água/cimento quando melhorada, não apresentou um resultado potencialmente tão benéfico quanto o aumento do cobrimento, apesar de ter também resultado em uma melhoria. Por fim, as armaduras de aço inoxidável apresentaram-se como uma solução muito eficiente em termos de vida útil. Por outro lado, esta é ainda uma solução muito cara em todo o mundo;
- A integração entre os atores presentes no IDM potencialmente amplia a possibilidade de obter melhores soluções de projeto, visto a gama de contribuições que cada equipe pode proporcionar. Além disso, um projeto realizado em um ambiente BIM, proporciona não apenas melhorias no projeto, mas também durante as fases de execução e manutenção do empreendimento, que é um grande problema em obras de infraestrutura.

Algumas recomendações para futuras pesquisas nessa área incluem:

- Considerar outros mecanismos de degradação, como a fadiga;

- Considerar outros parâmetros que influenciam na corrosão tais como melhorias na qualidade do concreto com aditivos e uso de outros materiais alternativos;
- Análise dos impactos econômicos decorrentes da variação da relação água cimento;
- Adaptar o fluxo de trabalho proposto para outros tipos de empreendimentos dentro da área de infraestrutura;
- Adaptar o fluxo de trabalho proposto para a etapa de manutenção e monitoramento de pontes.

ABNT. (2014). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento Design of structural concrete - Procedure, 238. <https://doi.org/01.080.10;13.220.99>

ACI Committee 222. (2001). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. Aci 222R-01, 1–41.

Afonso Vitório, E. (2005). Tema: a Importância Da Manutenção Para a Sustentabilidade Do Ambiente Construído. Título: Manutenção E Gestão De Obras De Arte Especiais. Retrieved from http://www.vitorioemelo.com.br/publicacoes/Manutencao_Gestao_Obras_Arte_Especiais.pdf

Alexander, M., & Beushausen, H. (2019). Cement and Concrete Research Durability , service life prediction , and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. **Cement and Concrete Research**, 122(February), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>

Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., & Castro, P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, 30(7), 1047–1055. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00265-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00265-9)

American Society of civil Engineers. (2013). American Infrastructure Report Card | Society of Civil Engineers. The 2013 **Report Card for America's Infrastructure**. Retrieved from <http://2013.infrastructurereportcard.org/>

Barros, N. N., & Silva, V. G. da. (2016). Bim Na Avaliação Do Ciclo De Vida De Edificações: Revisão Da Literatura E Estudo Comparativo Building Information Modelling (Bim) in Life Cycle Assesment: PARC Pesquisa Em **Arquitetura e Construção**, (7.2), 89–101. <https://doi.org/10.20396/parc.v7i2.8645401>

Borges, J. G., Caldas, L. R., Paulse, P. D. C., Emmanuela, K., Hora, R., Tereza, M., & Carvalho, M. (2018). Uso do BIM no processo de quantificação de

emissões de CO₂ no projeto de edificações: Estudo de caso para o software Designbuild. Use of BIM in the CO₂ emission quantification process in building design : case study for the DesignBuilder software. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, 14(1), 142–156. <https://doi.org/10.5216/reec.v14i1.47802>

Bradley, A., Li, H., Lark, R., & Dunn, S. (2016). BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. **Automation in Construction**, 71, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>

Calmon, L., & Fiorot, K. F. (2006). Diagnóstico do processo de gestão da durabilidade de obras públicas no estado do Espírito Santo, (1), 2932–2941. **xi Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**.

Dahlstrom, S. E., Persson, J. (2018). Implementação do uso de aço inox.pdf.

Dave, B., Boddy, S., Koskela, L., **Visualisation, P., & Information, B.** (2010). Chanllenges and opportunities in implementing lean and BIM on na infrastructure project, 741–750.

Design, L., Frangopol, D. M., Dong, Y., & Sabatino, S. (2017). Bridge life-cycle performance and cost : analysis , prediction , optimisation and decision-making. **Structure and Infrastructure Engineering**, 2479(January), 1–19. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1267772>

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). **BIM Handbook - Manual BIM - ED.1 - PT-BR CHUCK EASTMAN - LQ.pdf**. <https://doi.org/10.1002/mds.25909>

Elkington, J. (2013). Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business. *Choice Reviews Online*, 36(07), 36-3997-36-3997. <https://doi.org/10.5860/choice.36-3997>

Fedorik, F., Makkonen, T., & Heikkilä, R. (2017). FEA in Road Engineering Applications , (Isarc).

For, L., By, R., Enright, M. P., Member, A., & Frangopol, D. M. (1999). FOR, 2(December), 1407–1414.

Gjorv, O. E. (2015). **Projeto da Durabilidade de Estruturas de Concreto em Ambientes de Severa Agressividade (Vol. 1)**.

Guerra, M. E. A., & Lopes, A. F. A. (2015). Arquitetura Verde: Contribuições a Partir Da Exemplificação De Tipologias Vinculadas À Sustentabilidade Urbana.

- Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes, 3(5), 1–17.
<https://doi.org/10.17271/23178604352015951>
- Guimarães, A., Castro, P., Nunes, J. (2015). Teor de Cloretos Próximos a Superfície do Concreto em Ambientes Marítimos, (1), 1–11.
- Helene, P. Tula, S. (n.d.). BT - Contribuição ao estudo da resistencia a corrosão de armaduras de aço inoxidável.pdf.
- Kendall, A., Keoleian, G. A., & Helfand, G. E. (2008). Integrated Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis Model for Concrete Bridge Deck Applications, (September), 214–222.
- Kim, S., Choi, J., Ham, S., & Heo, W. (2016). applied sciences Reliability Evaluation of a PSC Highway Bridge Based on Resistance Capacity Degradation Due to a Corrosive Environment.
<https://doi.org/10.3390/app6120423>
- Kumar, B., Cai, H., & Hastak, M. (2017). An assessment of benefits of using BIM on an infrastructure project. International Conference on Sustainable Infrastructure 2017: Technology - **International Conference on Sustainable Infrastructure** 2017, 88–95. <https://doi.org/10.1061/9780784481219.008>
- Lourenço, C., Vinícius, M., & Mendes, L. C. (2009). Verificação da corrosão e de outras patologias em pontes metálicas Inspection of corrosion and other pathologies in metallic bridges. **Teoria e Prática Na Engenharia**, 25–29. Retrieved from http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art3_N14.pdf
- Da Costa, B. C. (2012). Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil. n. Fevereiro, 2012.
- Ma, Y., Wang, L., Zhang, J., Xiang, Y., & Liu, Y. (2014). Bridge Remaining Strength Prediction Integrated with Bayesian Network and In Situ Load Testing. **Journal of Bridge Engineering**, 19(10), 04014037.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000611](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000611)
- Machado, F. A., & Moreira, L. C. de S. (2015). O Uso De Ferramentas Bim Na Otimização Do Método De Avaliação Do Ciclo De Vida Da Edificação, 275–287. <https://doi.org/10.5151/engpro-tic2015-025>
- Markeset, G. (2008). Stainless steel reinforcement in concrete structures – State of the art. **Sintef Uilding and Infracture**.

- Marzouk, M., Abdelkader, E. M., & Al-Gahtani, K. (2017). Building information modeling-based model for calculating direct and indirect emissions in construction projects. **Journal of Cleaner Production**, 152, 351–363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.138>
- McGraw Hill Construction. (2012). The Business Value of BIM in North America. **SmartMarket Report**.
- MEDEIROS, M., ANDRADE, J., & HELENE, P. (2011). Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, 1, 773–808.
- Mock, P. (2020). January 2019. CO2 Emissions standards for passenger cars and light-commercial vehicles in the European Union, (January 2019).
- OLIVEIRA, C. B. L., GRECO, M., & BITTENCOURT, T. N. (2019). Analysis of the brazilian federal bridge inventory. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 12(1), 1–3. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000100002>
- Pinheiro, S., Wimmer, R., Donnell, J. O., Muhic, S., Bazjanac, V., Maile, T., ... Treeck, C. Van. (2018). Automation in Construction MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation. **Automation in Construction**, 90(November 2017), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.009>
- Progress, W., & Been, H. A. S. (2017). Reducing CO2 emissions from heavy-duty vehicles.
- R. Gonçalves. (2009). Ricardo de Figueiredo Gonçalves Poças avaliou Gestão do Ciclo de vida de Pontes. Março, 2009.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., & Rydberg, T. (2004). Life cycle assessment Part 1 : Framework , goal and scope definition , inventory analysis , and applications, 30, 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Rocha, F. C., Campos, H. F., & Soares-andrade, T. (2014). Cloretos nas leituras de potencial de corrosão de armaduras. Influence of the covering thickness and chloride contamination in the readings of corrosion potential of steel reinforcement.
- Saad, T., Asce, S. M., Fu, C. C., & Asce, F. (2015). Determining Remaining Strength Capacity of Deteriorating RC Bridge Substructures, 29(5), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000467).

- Sacks, R., Kedar, A., Borrmann, A., Ma, L., Brilakis, I., Hühthwohl, P., ... Muhic, S. (2018). SeeBridge as next generation bridge inspection : Overview , Information Delivery Manual and Model View De fi nition. **Automation in Construction**, 90(May 2017), 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.033>
- Santos, R., Costa, A. A., Silvestre, J. D., & Pyl, L. (2019). Automation in Construction Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment. **Automation in Construction**, 103(February), 127–149. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.011>
- Seif, O., & Engineer, S. (n.d.). on the Use of Building Information Modeling in. Shou, W., Wang, J., Wang, X., & Chong, H. Y. (2015). A Comparative Review of Building Information Modelling Implementation in Building and Infrastructure Industries. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 22(2), 291–308. <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9125-9>
- Silva, V. M., & De Mattos, V. L. D. (2017). O método dos mínimos quadrados no ajuste de um modelo polinomial. *Scientia Plena*, 13(4), 1–8. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2017.049910>
- Skovsgaard, T. (n.d.). Arminox_SSReinforce__Report_Arminox_web_ - principais usos.pdf.
- Stein. (2004). Economic considerations in desingning bridge scour, (1), 1–10.
- Suo, Q., & Stewart, M. G. (2009). Corrosion cracking prediction updating of deteriorating RC structures using inspection information. **Reliability Engineering and System Safety**, 94(8), 1340–1348. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.02.011>
- Thoft-Christensen et al., 1996. (1996). Aalborg Universitet Assessment of the Reliability of Concrete Slab Bridges Thoft-Christensen, Palle; Jensen, F. M.; Middleton, C. R.; Blackmore, A.
- Westwater, J. W., & Drickamer, H. G. (1957). The Mathematics of Diffusion. **Journal of the American Chemical Society**, 79(5), 1267–1268. <https://doi.org/10.1021/ja01562a072>
- Yang, Z., Peng, H., Wang, W., & Liu, T. (2010). Crystallization behavior of poly(ε-caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, 116(5), 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/app>

Apêndice A

Figura A-1 – IDM – Mapa de processos.

