

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Kássio Joe Stein

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS
COMBINADOS DE CORROSÃO E FADIGA EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO**

Porto Alegre
Dezembro 2016

KÁSSIO JOE STEIN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS
COMBINADOS DE CORROSÃO E FADIGA EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO**

Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação a ser apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre
Dezembro 2016

KÁSSIO JOE STEIN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS
COMBINADOS DE CORROSÃO E FADIGA EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) da Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de dezembro de 2016

Profa. Ângela Gaio Graeff
Ph.D. pela Universidade de Sheffield
Orientadora

Profa. Mônica Regina Garcez
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Relatora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
Ph.D. pela Universidade de Sheffield

Profa. Mônica Regina Garcez (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
PhD em Engenharia Civil pela *Leeds University*

Dedico esse trabalho à minha mãe, Nerli Terezinha Stein,
que sempre acreditou em mim, mesmo quando eu não
acreditava. Dedico também aos amigos que me apoiaram e
aconselharam durante essa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Nerli Terezinha Stein, por me escolher como filho e me amar incondicionalmente. Obrigado por acreditar em mim durante todos esses anos. Não tenho palavras suficientes para expressar a minha gratidão por todas as coisas que você fez e tem feito até o momento. Sou eternamente grato pelas roupas lavadas, pelo café passado e por colocar minhas vontades, muitas vezes, na frente das tuas. Tu és um exemplo de mãe, amiga e ser humano. Tenho muito orgulho de ser teu filho e espero te orgulhar com essa nossa conquista. Mãe, conseguimos!

Gostaria também de agradecer a equipe do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, aos seus técnicos, secretárias, professores, doutorandos, mestrandos e colaboradores em geral. É muito bom trabalhar com aquilo que se gosta, mas trabalhar com quem você gosta dá um valor ainda mais especial ao conjunto. Luciane Caetano, muito obrigado pela ajuda durante os ensaios e pelas conversas de aconselhamento. Fontes e Edgar, obrigado pelos ensinamentos e pela paciência. Ângela Graeff, minha admiração por você cresce a cada dia. Nunca vou me esquecer da nossa conversa na recepção do LEME quando ainda era bolsista de iniciação científica. Em momentos difíceis, sempre que precisei de uma “mão”, você me deu um “braço”. Muito obrigado por toda confiança depositada em mim, pelo carinho e orientação durante todo o TCC. Quero muito continuar essa parceria e te chamar de colega em um futuro próximo.

Agradeço também a empresa Arcelor Mittal, em especial a Margarete Lizardo, pela doação do aço utilizado na pesquisa. Também quero registrar a minha gratidão ao professor João Luiz Campagnolo por todo o conhecimento passado na disciplina de Patologia e Instrumentação das Construções, que foi de fundamental importância para a realização desse trabalho.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho na Dallasanta Empreendimentos e Incorporações LTDA e aos colegas da UFRGS. Sem vocês meus dias não seriam tão divertidos. Vocês me fizeram amadurecer e ter certeza de que escolhi a profissão certa.

Para finalizar, agradeço aos meus amigos que riram, choraram, ficaram angustiados e comemoraram minhas vitórias e, acreditem, derrotas durante esses 6 longos anos de estudante de Engenharia Civil na UFRGS. Valeu, Samuel Pasqualin, Rodrigo Viana, Wagner Ellwanger, Pedro Klein, Brenda Mentz e Nelson Mello. Amo vocês!

Só existem dois dias no ano em que nada pode ser feito:
um se chama ontem e o outro, amanhã. Portanto, hoje é o
dia certo para amar, acreditar, fazer e, principalmente,
viver!

Dalai Lama

RESUMO

O modal rodoviário exerce grande influência na economia brasileira. A malha rodoviária é responsável por mais da metade da movimentação anual de cargas e passageiros em território nacional. A execução de novas obras de arte especiais, ou pontes e viadutos, é seguidamente alvo de campanha eleitoral, porém a manutenção e conservação das OAEs já construídas têm ficado em segundo plano. Muitas dessas estruturas já se encontram perto do final ou além da sua vida útil de projeto. Efeitos individuais de fadiga e corrosão causam danos agressivos aos materiais que compõe o concreto armado. No entanto, quando se verifica a ocorrência associada dessas manifestações patológicas, podem ocorrer prejuízos ainda maiores a estrutura como um todo. O desgaste de um material sob a ação conjunta de corrosão e cargas cíclicas é definido como corrosão-fadiga. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a perda de resistência mecânica de vigas de concreto armado, submetidas a efeitos de fadiga e corrosão desassociados ou/e em conjunto, visando uma comparação entre os resultados. Ao todo foram moldadas oito vigas. Duas delas serviram como testemunho, ou seja, são vigas sãs sem qualquer manifestação patológica. Duas vigas foram submetidas a ensaios de corrosão acelerada. Outras duas foram submetidas a ensaios de fadiga e as vigas restantes foram então submetidas a ensaios de corrosão e fadiga. Foi observado que as vigas fatigadas apresentaram um comportamento semelhante aos testemunhos, apesar de apresentar um deslocamento vertical mais acentuado. Quando se comparam as vigas testemunhos com as corroídas, percebe-se uma baixa redução da carga de ruptura e aumento do deslocamento vertical de 27% nas vigas com perda de massa de 14% e de 40% nas vigas com perda de massa de 9%. No entanto, quando combinados os dois efeitos, a capacidade portante das vigas diminuiu mais que 50%, o que indica um efeito sinérgico muito influente e que não pode ser desconsiderado.

Palavras-chave: corrosão, fadiga, concreto armado, vigas, sinergia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama das etapas da pesquisa.....	20
Figura 2 - Pirâmide de Djoser.....	22
Figura 3 - Panteão, Roma.	24
Figura 4 - Coliseu, Roma.....	24
Figura 5 - Formação das zonas catódicas e anódicas	28
Figura 6 - Representação do avanço da frente de carbonatação	29
Figura 7 - Variação cíclica de tensões com amplitude constante	34
Figura 8 - Curva S-N	34
Figura 9 - Curvas Tensão-Deformação de diferentes tipos de corpos-de-prova	36
Figura 10 - Efeito da frequência de carregamento e da agressividade do ambiente na vida útil das estruturas de concreto armado.....	37
Figura 11 - Brita utilizada na concretagem das vigas.....	40
Figura 12- Curva granulométrica da brita	40
Figura 13 - Areia utilizada na concretagem das vigas.....	41
Figura 14- Curva granulométrica da areia média	42
Figura 15 - Cimento utilizado na concretagem das vigas.....	43
Figura 16 - Barras utilizadas como armadura positiva, negativa e estribos	44
Figura 17 - Configuração da armadura.....	45
Figura 18 - Equipamentos utilizados na montagem da armadura	45
Figura 19 - Armadura após término da montagem.....	46
Figura 20 - Armadura com o fio de cobre posicionado em cima da mesma	47
Figura 21 - Detalhe do canto da armadura	47
Figura 22 - Espaçadores de cimento e areia	48
Figura 23 - Formas preparadas com desmoldante	48
Figura 24 - Armaduras posicionadas e prontas para concretagem	49
Figura 25 - Betoneira utilizada na concretagem.....	50

Figura 26 - Equipamento utilizado no ensaio de abatimento	51
Figura 27 - Ensaio de abatimento	51
Figura 28 - Adensamento das vigas.....	52
Figura 29 - Vigas após adensamento e desempenho da superfície.....	52
Figura 30 - Corpos-de-prova após vibração e desempenho	53
Figura 31 - Vigas envolvidas pelo geotêxtil.....	53
Figura 32 - Configuração geral do ensaio	55
Figura 33 - Organograma das vigas ensaiadas	55
Figura 34 - Produtos de corrosão formados e dissolvidos na solução.....	56
Figura 35 - Fonte calibrada com 320 mA de corrente contínua	57
Figura 36 - Redução da corrente.....	57
Figura 37 - Vigas separadas de acordo com a resistência à corrente elétrica.....	58
Figura 38 - Calibração final da fonte.....	59
Figura 39 - Viga após o ensaio de corrosão acelerada	59
Figura 40 - Produtos do ensaio de corrosão acelerada	60
Figura 41 - Vigas submetidas ao ensaio de flexão a 4 pontos.....	60
Figura 42 - Configuração do ensaio de flexão.....	61
Figura 43- Ensaio de flexão a 4 pontos	61
Figura 44 - Relógio comparador usado para medir o deslocamento provocado pelo carregamento	62
Figura 45 - Rompimento da viga com 9% de perda de massa da armadura	63
Figura 46 - Rompimento da viga com 14% de perda de massa da armadura.....	63
Figura 47 - Deslocamento do cobrimento provocado pela corrosão	64
Figura 48 - Vigas rompidas e carga de ruptura (kgf)	64
Figura 49 - Retirada das barras de 8 mm dos corpos-de-prova.....	65
Figura 50 - Barras com produtos de corrosão	65
Figura 51 - Barras após limpeza com solução ácida	66
Figura 52- Ensaio de fadiga - vista frontal	67

Figura 53- Ensaio de fadiga - vista lateral	68
Figura 54 - Ensaio de flexão a quatro pontos de uma das vigas fatigadas	69
Figura 55 - Ensaio de flexão de umas das vigas corroídas e fatigadas.....	69
Figura 56 - Gráfico Carregamento x Deslocamento (testemunhos, vigas fatigadas, vigas corroídas e vigas corroídas e fatigadas).....	71
Figura 57 - Carga de ruptura das vigas ensaiadas	72
Figura 58 - Diminuição da carga de ruptura em comparação a média da carga de ruptura dos testemunhos	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica da brita.....	41
Tabela 2 - Composição granulométrica da areia	42
Tabela 3 - Características do CP-V ARI da empresa Nacional.....	43
Tabela 4 - Traço utilizado na concretagem	49
Tabela 5 - Resultados do ensaio de abatimento.....	50

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAIM - Corrosão Acelerada por Imersão Modificada

CEB - *Comite Euro-International du Beton*

CNT - Confederação Nacional do Transporte

CP - Corpo-de-prova

DECIV - Departamento de Engenharia Civil

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

EE - Escola de Engenharia

ISO - *International Organization for Standardization*

OAE - Obra de Arte Especial

TCU - Tribunal de Contas da União

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UR - Umidade Relativa

NBR - Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

C - Concentração de íons na solução

c - constante adimensional

D - Coeficiente de difusão

F - Fluxo de massa

k_p - Permeabilidade do material

m - Inclinação negativa da curva

N - número de ciclos para a iniciação de fratura

η - Viscosidade do material

p - Pressão do fluido

$\Delta\sigma$ - Variação de tensão

x - Profundidade considerada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	17
2.1. QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	17
2.2.1 Objetivo principal	17
2.2.2 Objetivo secundário	17
2.3 HIPÓTESE	17
2.4 PRESSUPOSTO.....	18
2.5 PREMISA.....	18
2.6 DELIMITAÇÕES.....	18
2.7 LIMITAÇÕES	18
2.8 DELINEAMENTO.....	19
3 ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS RELACIONADOS À DURABILIDADE E VIDA ÚTIL.....	22
3.1. BREVE RESUMO HISTÓRICO DO CONCRETO.....	22
3.2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL	25
4 CORROSÃO	27
4.1 CARBONATAÇÃO	28
4.2 ÍONS CLORETO	30
4.3 IMPACTOS ESTRUTURAIS	32
5 FADIGA	33
6 CORROSÃO-FADIGA	36
7 PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
7.1 MATERIAIS	39
7.1.1. Brita	39
7.1.2 Areia	41
7.1.3 Cimento	42
7.1.4 Barras de aço	43
7.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	44
7.2.1 Montagem das armaduras	44
7.2.2 Traço e concretagem.....	49

7.3 CORROSÃO ACELERADA	53
7.4 ENSAIOS PRELIMINARES	60
7.5 ENSAIO DE FADIGA	66
8 RESULTADOS	70
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária exerce grande influência no desenvolvimento econômico do Brasil, levando em consideração que o modal mais utilizado em território nacional é o rodoviário. De acordo com o Boletim Estatístico da Confederação Nacional do Transporte (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2016), as rodovias são responsáveis por 61,1 % da movimentação anual de cargas e passageiros.

A execução de pontes e viadutos é, seguidamente, alvo de promessas e campanhas eleitorais. Entretanto, outro fator que vem preocupando a população e entendidos do assunto é o descaso em relação à manutenção e conservação das estruturas já existentes, principalmente pelo fato de que muitas já se encontram perto do final ou além de sua vida útil de projeto.

São vários os fatores que influenciam a vida útil das obras de arte especiais (OAEs), ou pontes e viadutos. Dentre estes fatores, chama-se atenção aos efeitos de fadiga e possível corrosão dos elementos de concreto armado que compõem estas estruturas. Pelo fato destas estruturas se encontrarem concomitantemente expostas ao ambiente (e conseqüentemente aos agentes agressivos) e submetidas a cargas cíclicas oriundas da passagem de veículos, é também interessante observar que estas estruturas podem estar submetidas a um efeito combinado de fadiga e corrosão.

Segundo os estudos de Yi et al. (2010) e Chen et al. (2009), existe uma interação considerável entre ambas manifestações patológicas, sendo a ocorrência das mesmas em conjunto mais prejudicial às estruturas do que cada manifestação desassociada. O desgaste de um material sob a ação conjunta de corrosão e cargas cíclicas é definido como corrosão-fadiga.

Sabe-se que, na construção civil, há diversos materiais que possuem alta resistência mecânica, porém esses mesmos materiais possuem baixa resistência à corrosão, e vice-versa. Além disso, existem evidências de que a corrosão diminui a aderência entre a armadura e o concreto, favorecendo o desgaste por fadiga. Por outro lado, o processo fatigante produz fissuras no concreto de cobrimento, expondo a armadura ao processo de corrosão.

Visando contribuir para o entendimento do fenômeno de sinergia entre a corrosão e a fadiga, neste trabalho são estudados alguns conceitos fundamentais através da elaboração de uma revisão bibliográfica e de estudos experimentais. Na avaliação experimental, vigas de concreto armado foram submetidas em laboratório à aceleração de corrosão e a cargas cíclicas, visando uma comparação entre os danos causados pela atuação isolada de cada manifestação patológica e pela atuação conjunta de ambas.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1. QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: os efeitos combinados de fadiga e corrosão causam uma maior perda de resistência à flexão do que estes mesmos efeitos desassociados em vigas de concreto armado?

2.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar os efeitos combinados da corrosão e fadiga em vigas de concreto armado através de uma análise experimental, e comparar os resultados com vigas deterioradas apenas por corrosão ou fadiga, e com vigas não deterioradas.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é desenvolver um método de pesquisa que permita avaliar, dentro das limitações da pesquisa, qual a influência conjunta da corrosão e fadiga em comparação com a influência individualizada de cada manifestação.

2.3 HIPÓTESE

Têm-se como hipótese do trabalho que os danos causados pela interação da corrosão com a fadiga são maiores que a soma dos dois efeitos apresentados separadamente.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que através da metodologia do ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) associada à Lei de Faraday será possível prever um grau de corrosão da armadura (aproximadamente 10% de perda de massa) que garanta uma perda de desempenho mecânico considerável no elemento ensaiado.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem a premissa de que os estudos realizados sobre o assunto não apresentam informações detalhadas sobre a sinergia dos efeitos de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado, tampouco a comparação dos efeitos quando ocorrem separados ou de maneira simultânea.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a analisar o efeito da sinergia entre corrosão e fadiga experimentalmente em vigas de concreto armado, sendo que o concreto utilizado possui resistência à compressão igual a 25 MPa.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a utilização de um único traço de concreto, definido pelo valor da resistência à compressão média igual a 25 MPa. Não serão estudados concretos de maior resistência, pois apresentam baixa porosidade, o que dificultaria a passagem de corrente nos corpos de prova para simular a corrosão;
- b) o estudo de apenas uma geometria de viga de concreto armado, nas dimensões de 7 x 14 x 130 cm;
- c) a utilização de um único grau de corrosão: serão estudadas armaduras com aproximadamente 10% de perda de massa no programa experimental;
- d) o uso de apenas uma técnica para aceleração de corrosão foi utilizada, baseando-se na metodologia do ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) com aplicação de corrente constante. Salienta-se que ainda não existe correlação entre essa técnica e o processo de corrosão que acontece em estruturas reais;

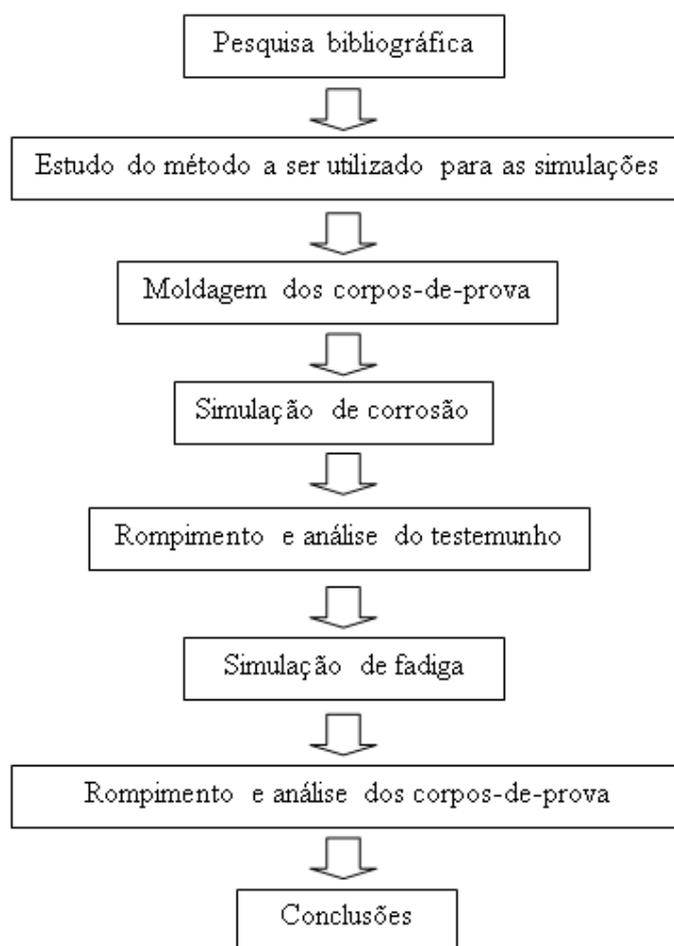
- e) a variação de tensão aplicada na simulação de fadiga foi de 50 - 5 % da tensão de ruptura à flexão das vigas testemunho ensaiadas, e o número de ciclos aplicados, por sua vez, foi igual a 200.000.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que são representadas na Figura 1.

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) estudo do método a ser utilizado para as simulações;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) simulação de corrosão;
- e) rompimento e análise do testemunho;
- f) simulação de fadiga;
- g) rompimento e análise dos corpos de prova restantes;
- h) conclusões.

Figura 1 - Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** tem como objetivo promover conhecimento sobre o assunto abordado por meio da leitura de livros, teses de doutorado, dissertações de mestrado e artigos. Através dela foi possível entender o efeito da corrosão e da fadiga separadamente. E após o entendimento dos fenômenos de maneira individual, foi estudada a sinergia entre eles e suas possíveis consequências nas estruturas de concreto armado.

Antes de iniciar a simulação da corrosão e da fadiga foi necessário definir os métodos que seriam utilizados para o programa experimental e como eles funcionariam. Para tal problema foi necessário realizar um **estudo do método a ser utilizado para as simulações da corrosão e da fadiga**. Essa foi uma das principais fases desse trabalho, pois além do método, foram definidas as dimensões dos corpos de prova (CPs), o traço do concreto utilizado e o cronograma com as datas de concretagem, simulações e ensaios.

A **moldagem dos corpos de prova** marcou a etapa inicial dos experimentos. Após esse período, iniciou-se a **simulação de corrosão** através do ensaio CAIM.

Uma vez concluída a simulação descrita acima, realizou-se o **rompimento à flexão e análise dos testemunhos**. O rompimento dos testemunhos tornou-se necessário para o início da próxima fase que será a **simulação de fadiga**.

Após o término do ensaio de fadiga, realizou-se o **rompimento à flexão e análise dos corpos de prova** restantes.

O presente trabalho encerrou-se com as **conclusões** acerca da interação dos fenômenos simulados e suas consequências nos elementos estruturais estudados.

3 ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS RELACIONADOS À DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

Neste capítulo será abordado um breve histórico do surgimento do material concreto até o concreto armado dos dias atuais. Também serão apresentadas as definições de durabilidade e vida útil para a melhor compreensão dos assuntos tratados mais adiante neste trabalho.

3.1. BREVE RESUMO HISTÓRICO DO CONCRETO

Os Egípcios foram o povo que inventaram o nobre título de arquiteto. Essa denominação foi concedida a Imhotep, brilhante político e alquimista, após a elaboração do projeto e construção da primeira pirâmide durável do planeta, a Pirâmide escalonada de Djoser, (HELENE et al., 2010, p. 905) mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Pirâmide de Djoser



(fonte: LUCAS, 2013)

O conceito de vida útil, que será estudado mais a frente, foi introduzido pelos egípcios sem querer. A evolução foi tão grande que quando comparados com os egípcios, outras civilizações estavam engatinhando na arte de construir (HELENE et al., 2010, p. 908).

A pedra e a madeira foram os primeiros materiais usados em construções antigas. A pedra natural apresenta uma resistência à compressão e durabilidade muito elevadas, no entanto, deixa a desejar quando o assunto é sua resistência à tração. Por outro lado, a madeira peca quando o quesito é durabilidade, mas apresenta uma resistência mecânica razoável (BASTOS, 2006).

De acordo com Bastos (2006), com o passar do tempo, foram observadas limitações em relação ao desempenho desses materiais. A capacidade inventiva do homem fez com que a criação de novos materiais se tornasse uma necessidade.

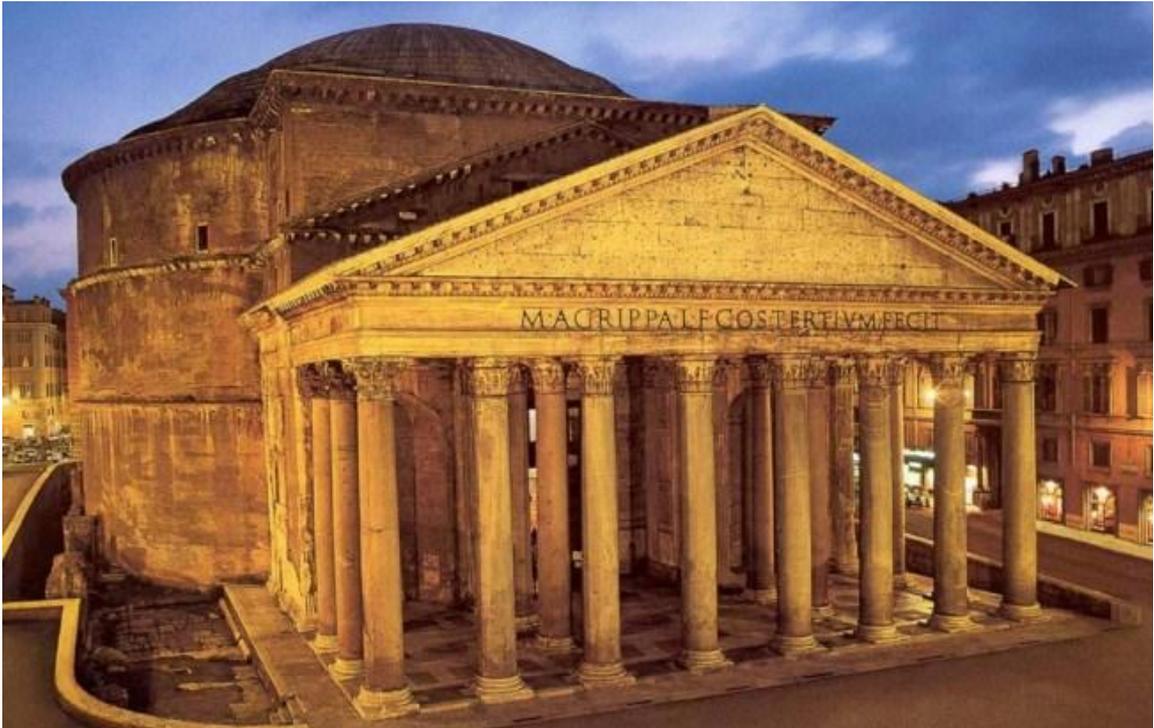
Segundo Helene et al. (2010, p. 905) o ferro e o aço surgiram devido a Revolução Industrial (1750 a 1850 d.C.). Ambos elementos apresentam elevadas resistências, porém a durabilidade deles é altamente influenciada pelo meio em que se encontram, podendo ser comprometida por processos como a corrosão (HELENE, 1993).

O concreto armado surgiu da necessidade de combinar a elevada resistência do aço com a incrível durabilidade da pedra. Adicionando os materiais citados anteriormente com areia e cimento, tem-se um composto que pode assumir qualquer forma, rápido e fácil de fazer e que ainda envolve o aço e protege o mesmo contra a corrosão (BASTOS, 2006).

Com a chegada do aço nos fins do século XVIII e início do século XIX foi possível ousar mais, elaborar construções em altura e com grandes espaços internos, saindo da restrição de vãos em forma de arco ou abóbadas com dimensões inferiores a 45 m (HELENE et al., 2010, p. 909).

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e construção civil da atualidade (HELENE et al., 2010, p. 905). Usado desde a época dos Romanos, o concreto é encontrado em construções marcantes como o Panteão, construído em 27 a.C. e o Coliseu, construído entre 69 e 79 d.C. Logo abaixo seguem as Figuras 3 e 4 que nos mostram o Panteão e o Coliseu, respectivamente (BASTOS, 2006).

Figura 3 - Panteão, Roma.



(fonte: LORENZI, 2016)

Figura 4 - Coliseu, Roma.



(fonte: PECELLÍN, 2016)

Com a adição da armadura de aço ao concreto, o concreto passou a ter, também, uma grande resistência à tração e sua aplicação ficou mais diversificada ainda, tornando possível projetar elementos estruturais de menores dimensões e com vãos maiores.

No Brasil, de acordo com Santos (2008), o concreto foi introduzido no início do século XX como produto patenteado e distribuído por filiais de firmas estrangeiras aqui estabelecidas. A instalação das cimenteiras começou em meados dos anos 1920, que foi quando se iniciou o processo de difusão da tecnologia do concreto. Em 1940, o concreto já estava normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e era aplicado em edificações de natureza variada, em OAEs ou ainda em edificações de caráter comum.

Segundo a Revista IBRACON (2009, p. 14), o concreto se destaca, principalmente, devido a duas de suas propriedades:

Duas propriedades do concreto que o destacam como material construtivo são: sua resistência à água – diferentemente do aço e da madeira, o concreto sofre menor deterioração quando exposto à água, razão de sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água – e sua plasticidade – que possibilita obter formas construtivas inusitadas, como se vê nas obras arquitetônicas de Niemayer. Mas existem outras vantagens: a disponibilidade abundante de seus elementos constituintes e seus baixos custos.

No entanto, o concreto, assim como qualquer outro material de construção, apresenta uma certa vida útil e sua durabilidade depende de diversos fatores, como por exemplo a sua exposição a intempéries. Antes de iniciar o estudo sobre o fenômeno de corrosão e fadiga, é de grande valia, revisar ambos os conceitos apresentados anteriormente.

3.2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

Não há como revisar o conceito de vida útil das estruturas de concreto sem antes estudar o que significa durabilidade. Segundo o Comitê Euro-International du Beton (1997), durabilidade é a capacidade de uma estrutura apresentar o desempenho exigido durante o período de tempo de utilização almejado, sob a influência de agentes degradantes. O conceito de durabilidade deve ser incorporado na elaboração do projeto e assim atender as exigências de desempenho e funcionalidade das edificações.

Por outro lado, a NBR 6118 define durabilidade como “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA

DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p.13). A norma citada anteriormente ainda determina que as estruturas de concreto devem:

[...] ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil

Sendo assim, percebe-se que a durabilidade está relacionada às características dos elementos que compõem a estrutura e às condições de exposição e uso as quais a estrutura está submetida durante sua vida útil. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) “uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade”.

A definição de vida útil, por sua vez, está mais ligada com a expectativa de duração da estrutura como um todo ou de suas partes. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 15) afirma que:

Por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) também estabelece que “o conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo”.

Atualmente, vem se falando bastante em desempenho, uma definição que inclui desempenho no conceito de vida útil foi elaborada pela ISO 13823 (2008), definindo-a “como o período efetivo de tempo durante o qual a estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo”.

Já a NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p.10), define como vida útil:

Período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos considerando a periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção (a vida útil não pode ser confundida com prazo de garantia legal e certificada).

4 CORROSÃO

Neste capítulo os assuntos principais serão a corrosão das estruturas de concreto armado e seus impactos nas mesmas. A corrosão das armaduras de aço produz danos significativos às estruturas de concreto armado, principalmente em zonas urbanas, costas e distritos industriais, isto é, onde há presença de cloretos provenientes de água salgada ou SO_2 ou CO_2 .

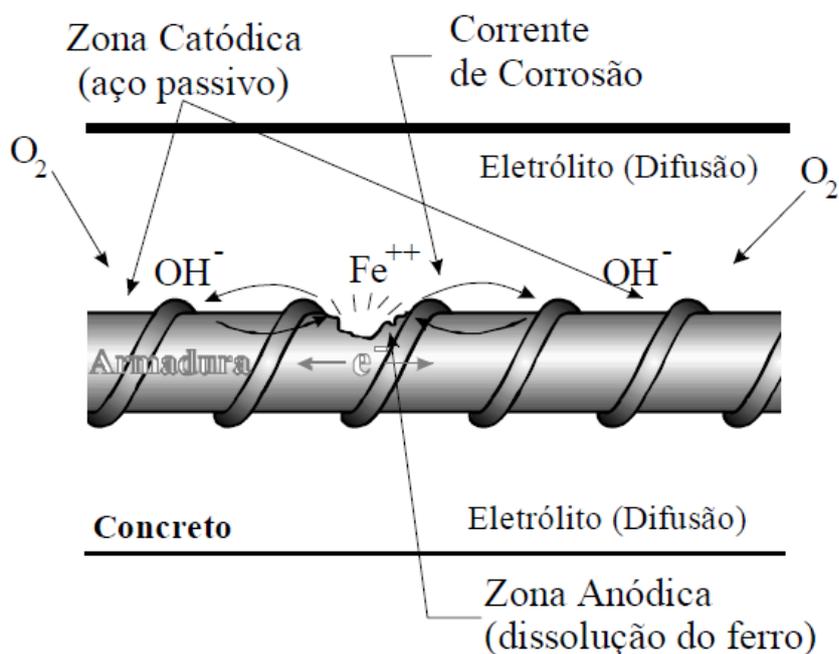
De acordo com Gentil (2011, p. 345) são basicamente dois os mecanismos de corrosão dos metais. O primeiro seria a oxidação, corrosão de caráter puramente químico que forma uma película delgada de produtos de corrosão na superfície do metal. A segunda forma seria a que ocorre nas estruturas de concreto armado, chamada de corrosão eletroquímica.

Apesar da corrosão de armadura ser a grande causa de fissuras graves no concreto, segundo Helene (1993), as barras de aço estão protegidas dentro do mesmo devido à sua alta alcalinidade. Esse ambiente com pH na faixa de 12,7 – 13,8 favorece a formação de uma camada de óxidos, oriundos da dissolução de hidróxidos presentes no cimento, que fica aderida ao aço, preenchendo os poros e evitando a corrosão desde que as condições de potencial e pH estejam estáveis.

No entanto, a corrosão das barras de aço inicia com o acúmulo de agentes agressivos na superfície do concreto. Esses mesmos agentes penetram no concreto pelos poros e fissuras e, quando saturados, reagem e formam ácidos que reduzem o pH e desestabilizam a camada passivante de óxidos, começando assim a despassivação das armaduras. Pode-se dizer, então, que há a formação de pilhas de corrosão, e por devido a esse fenômeno, algumas partes do metal se tornam catódicas e outras anódicas, de acordo com a Figura 5, adaptada de Cascudo (1997).

Por sua vez, esse produto resultante, que possui um volume maior que a camada de óxidos original, provoca o aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e o deslocamento do concreto de cobrimento. Além disso, esses fatores levam a perda de aderência entre o concreto e a sua armadura e também a diminuição da seção transversal das barras de aço, danificando assim a transferência de esforços e podendo levar a estrutura a colapso (FIGUEIREDO, 1994; MEHTA e MONTEIRO, 1994; AİTCIN, 2000).

Figura 5 - Formação das zonas catódicas e anódicas



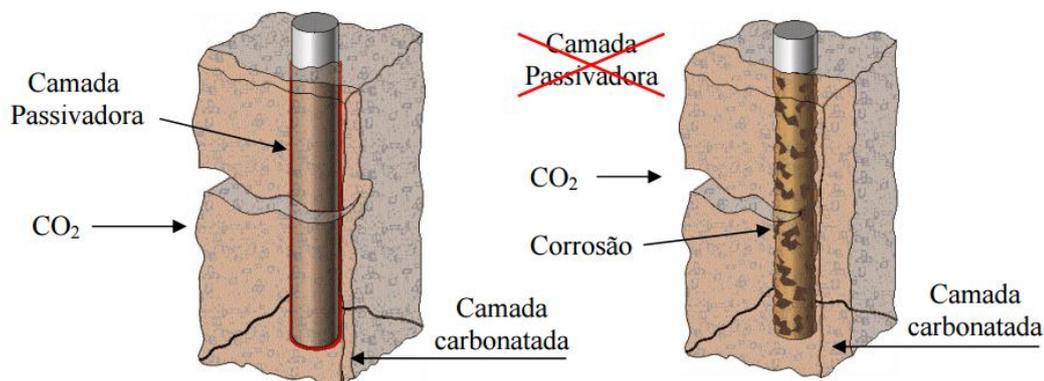
(fonte: CASCUDO, 1997)

A despassivação da armadura ocorre quando algum agente agressivo alcança o interior do concreto e altera as condições de estabilidade do mesmo junto à armadura. São vários os mecanismos que podem promover a despassivação. Entre eles, podem-se citar fissuras, fungos, reações expansivas com sulfatos, fuligem, carbonatação e íons cloreto (ANDRADE, 1992). Neste trabalho serão abordados dois agentes agressivos que podem promover a despassivação da armadura: a carbonatação e a presença de íons cloreto.

4.1 CARBONATAÇÃO

A carbonatação acontece devido à penetração de CO_2 através dos poros do concreto por difusão. O gás carbônico reage com o hidróxido de cálcio e acaba diminuindo a alcalinidade da camada de cobrimento da superfície exposta. Segundo Andrade e Gonzalez (1988), o pH do concreto pode atingir níveis próximos a 9, o que reduziria as condições de estabilidade da camada passivadora que envolve a armadura. A Figura 6 mostra o avanço da frente de carbonatação.

Figura 6 - Representação do avanço da frente de carbonatação



(fonte: Tula, 2000)

São vários os fatores que influenciam a carbonatação do concreto. Esse tópico foi revisado no trabalho de Andrade (2001), destacando as seguintes variáveis:

- concentração de CO_2 : A velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de CO_2 , principalmente para concretos de elevadas relações a/c. Para efeitos práticos, admite-se que o teor de CO_2 presente em um ambiente rural é da ordem de 0,03 % em volume; em ambiente de laboratório, adota-se tal teor como sendo igual a 0,1 % em volume. Já nas grandes cidades, este valor é da ordem de 0,3 %, também em volume.
- umidade relativa (UR) do ambiente: Esse parâmetro exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do CO_2 através dos poros do material. Quando os poros estão secos (baixa UR), o CO_2 difunde até as regiões mais internas sem dificuldade; porém, a reação de carbonatação não ocorre devido à ausência de água. Quando os poros estão cheios de água, a frente de carbonatação progride lentamente, devido à baixa difusibilidade do CO_2 na água. Por outro lado, se os poros estão apenas parcialmente preenchidos com água, a frente de carbonatação avança mais rapidamente devido à existência simultânea da água e da possibilidade de difusão de CO_2 . Assim, admite-se que as maiores velocidades de carbonatação ocorrem com uma UR variando entre 60 e 80 %;
- relação a/c: Tal fator está relacionado com a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido. Quanto maior for a relação a/c, maior será a porosidade e a

permeabilidade de um concreto, aumentando assim a penetração de CO₂ para o interior do material;

- tempo de cura: Quanto maior o tempo de cura, maior será o grau de hidratação do cimento, minimizando a porosidade e a permeabilidade, diminuindo a carbonatação nos concretos.

4.2 ÍONS CLORETO

Alguns estudos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado constataram que a corrosão provocada por íons de cloreto é um dos problemas mais graves que pode afetar as estruturas (ANDRADE, 1997; NEVILLE, 1997). São diversas as fontes que podem originar os íons cloretos, entre elas, destacam-se (HUSSAIN et al., 1995):

- emprego de aceleradores de pega que contém CaCl₂ (cloreto de cálcio);
- contaminação dos materiais constituintes do concreto (água e agregados);
- contaminação através da névoa salina (maresia);
- contato direto com a água do mar (estruturas marinhas);
- e através de determinados processos industriais.

No entanto, não há uma concentração específica de cloretos que possa provocar a despassivação da armadura. Segundo Alonso et al. (1997), isso ocorre devido aos diversos fatores que influenciam os fenômenos de transporte e absorção dos cloretos.

A identificação da penetração de íons de cloreto é feita através de ensaios específicos, pois não há alteração na aparência superficial do concreto, tampouco alteração na resistência do mesmo (CASCUDO, 1997).

De acordo com Kropp et al. (1995), a entrada de gases, água ou íons em soluções aquosas no concreto acontece devido à porosidade do mesmo ou à existência de microfissuras. O transporte dessas substâncias para dentro do concreto ocorre através de vários mecanismos físicos e químicos. Entre os fatores que influenciam tais mecanismos, podem ser citados: a concentração dessas substâncias, as características do meio no qual a estrutura de concreto se encontra, a temperatura, a porosidade e a espessura das fissuras existentes no concreto.

Segundo Kropp et al. (1995), os principais mecanismos de transporte são:

- difusão: transferência de massa por um movimento aleatório de moléculas livres ou íons na solução presente nos póros, resultando em uma rede de fluxo das regiões de maior concentração das substâncias para as regiões de menor concentração. O fluxo de massa é expresso pela primeira lei de Fick, através da equação a seguir:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

Sendo:

F = fluxo de massa;

D = coeficiente de difusão;

C = concentração de íons na solução;

x = profundidade considerada;

- permeabilidade: permeação de gases ou líquidos através dos poros, devido a uma pressão, representada pela lei de Darcy, expressa na equação abaixo:

$$F = -\frac{k_p}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

Sendo:

F = fluxo de massa;

k_p = permeabilidade do material;

η = viscosidade do material;

p = pressão do fluido;

x = profundidade considerada;

- absorção capilar: transporte de líquidos em sólidos porosos devido à tensão superficial nos vasos capilares;

- adsorção: fixação de moléculas ou íons em superfícies sólidas através de interações de natureza química ou física;
- dessorção: liberação de moléculas adsorvidas de superfícies sólidas.

4.3 IMPACTOS ESTRUTURAIS

De acordo com Caetano (2008), o comportamento da aderência entre barras de armadura com o concreto sofre grande influência negativa quando se estabelece um processo de corrosão intenso. Esse comportamento é influenciado pela bitola da barra e pelo grau de corrosão da mesma, sendo uma pequena redução no diâmetro da barra capaz de ocasionar uma grande redução da resistência de aderência.

O estudo desenvolvido por Caetano (2008) também observou que a tensão de aderência sofre um leve acréscimo para pequenos teores de corrosão, sendo o ponto de inflexão mais adequado em torno de 1,5 %. A partir desse ponto, o avanço da corrosão compromete cada vez mais a aderência. Os dados da pesquisa mostram que armaduras com 10 % de perda de massa já fazem com que a tensão de aderência caia abaixo do valor especificado em norma, principalmente em corpos de prova com barras de grande diâmetro e nervuras pequenas.

Além dos problemas relacionados à aderência, Helene (1993) explica que o processo corrosivo também gera produtos que se depositam fora da superfície da armadura, aos arredores desta, nos poros, capilares e fissuras do concreto. Esse acúmulo dos produtos corrosivos vai gerar um aumento de volume que, por sua vez, produzirá esforços que geram tensões de tração no concreto. Essas tensões acabam gerando fissuras e deslocamento do concreto de cobertura, levando ao enfraquecimento da aderência e ancoragem entre o concreto e o aço, o que afeta diretamente a vida útil dos elementos de concreto armado.

5 FADIGA

Esse capítulo tem como objetivo apresentar o efeito da fadiga em estruturas de concreto armado. Fadiga é um fenômeno ligado às ações dinâmicas repetitivas que, muitas vezes, podem causar a perda de resistência do material. Devido ao fato do concreto possuir baixa capacidade de deformação, as alterações são permanentes e pontuais, como também, geram e propagam fissuras, principalmente em pontos onde há concentração de tensões.

O concreto armado utilizado em pontes e viadutos está sujeito a variações cíclicas de tensão devido à passagem de veículos. Este fato faz com que a vida útil da estrutura esteja diretamente ligada à capacidade que a estrutura tem de resistir a este fenômeno. Estudos realizados por Baroni (2010) concluíram que o crescimento do volume de fluxo de veículos pesados está acelerando os danos e reduzindo a vida útil de fadiga esperada de vigas de tabuleiro de pontes, sendo especialmente sensíveis as vigas de pequenos vãos com balanço. O trabalho também concluiu as estruturas de obras de arte especiais construídas antes de 1985, podem encontrar-se em situações de risco e que a ação da fadiga em estruturas corroídas é mais rápida e preocupante. Por esse motivo é necessário que essas obras de arte especiais sejam projetadas para suportar os acréscimos de peso e a variação de volume de tráfego, no entanto, as normas brasileiras não reproduzem esse carregamento de maneira exata (ROSSIGALI, 2013), o que atrapalha a composição da combinação de ações para a verificação de fadiga. Aliado a esse fato, tem-se a propagação das fissuras após os ciclos de carregamento e a redução da área útil da seção (CERVO, 2004).

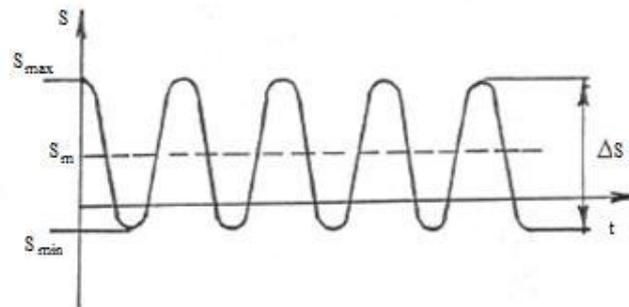
De acordo com Cervo (2004, p. 5) o processo de ruptura por fadiga se divide em três etapas:

- abertura das fissuras: os danos são pequenos e progridem de forma gradual;
- propagação das fissuras: danos maiores e piores a cada ciclo de carregamento suportado pela estrutura;
- ruptura: comprometimento da estrutura.

Por se tratar de um fenômeno influenciado pelo acúmulo de danos ao longo do tempo, torna-se essencial o estudo do comportamento mecânico dos materiais que compõem as estruturas, com o intuito de evitar possíveis falhas.

O desempenho dos materiais submetidos à fadiga é geralmente caracterizado pela curva de Wöhler, ou curva S-N, como também é conhecida. Essa curva correlaciona a variação de tensão (S) com o número de ciclos necessário para abertura de uma fissura (N). Um ciclo é o intervalo de tempo entre dois picos consecutivos de tensão. A Figura 7 mostra a variação cíclica de tensões com amplitude constante.

Figura 7 - Variação cíclica de tensões com amplitude constante

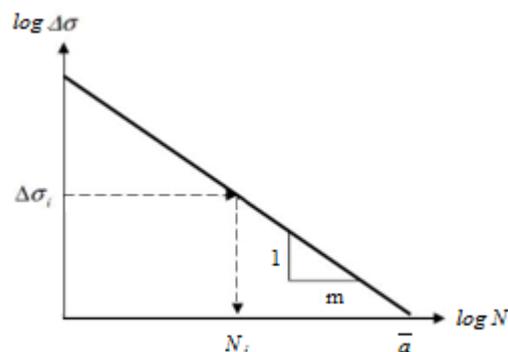


(fonte: BELISÁRIO, 2015)

Baseando-se nessa variação de tensão, a curva S-N fornece o número máximo de ciclos que a peça é capaz de suportar quando submetida a uma tensão compressiva, trativa ou cisalhante (GURNEY, 1976).

As curvas S-N se aproximam de uma reta e são representadas em escala logarítmica, como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Curva S-N



(fonte: BELISÁRIO, 2015)

Matematicamente, a curva é representada através da seguinte expressão (5.1):

$$N = c \times (\Delta\sigma)^{-m} \quad (5.1)$$

Sendo:

N = número de ciclos para a iniciação de fratura;

c = constante adimensional;

$\Delta\sigma$ = variação de tensão;

m = inclinação negativa da curva.

Os gráficos são traçados com dados adquiridos através de ensaios experimentais.

A identificação do efeito fatigante se torna difícil quando o alvo são estruturas de concreto armado. Devido a sua composição não homogênea, as fissuras não seguem um padrão definido (COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, 1987). Além disso, a propagação dessas fissuras diminui a seção transversal do concreto, e assim reduz a aderência entre o concreto e as barras de aço (FERNANDES, 2000).

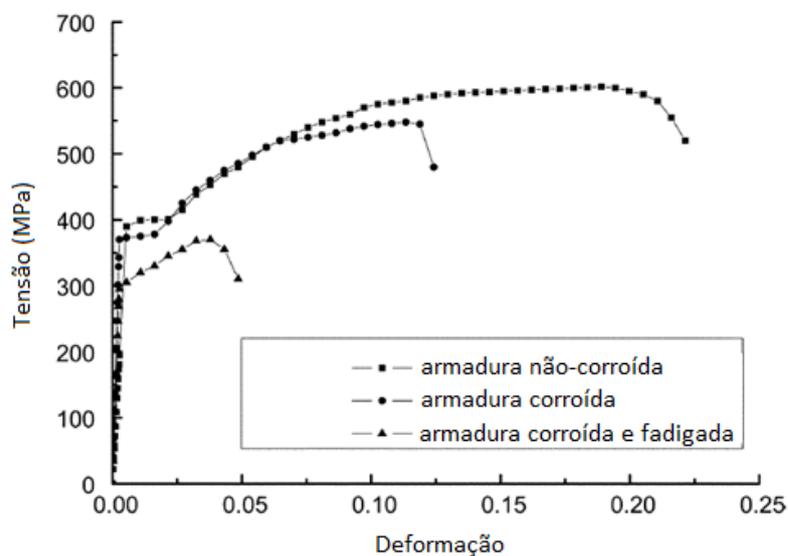
A resistência do concreto armado à fadiga é determinada como uma porcentagem da resistência estática suportada por um determinado número de ciclos (ACI 215R 1991). No entanto, o tipo de carregamento, a tensão máxima a qual a estrutura está submetida, as características do concreto e a amplitude das tensões também influenciam essa resistência. Quanto maior a variação de tensão, menor o número de ciclos que a estrutura é capaz de resistir. O tipo de solicitação também é determinante para a resistência da estrutura. Fatores como o diâmetro, inversamente proporcional à resistência à fadiga (ACI 215R 1991), e o raio de curvatura das barras de aço também devem ser levados em consideração, além da classe de agressividade do ambiente no qual a estrutura se encontra (COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, 1987).

6 CORROSÃO-FADIGA

Neste capítulo será abordado o fenômeno chamado corrosão-fadiga, que abrange a sinergia entre ambos os fenômenos de deterioração (corrosão de armaduras e fadiga) atuando ao mesmo tempo em uma estrutura de concreto armado. Por ser um assunto novo e, ainda, pouco estudado, não se sabe exatamente quais as consequências do efeito em elementos de concreto armado.

Estudos mostraram que o aumento no grau de corrosão das armaduras diminuiu a resistência à fadiga de vigas de concreto armado, fazendo com que as mesmas rompessem fragilmente (YI et al., 2010). O estudo de Yi et al. (2010) constatou que vigas com armaduras não corroídas resistiram mais de 2.000.000 ciclos de fadiga. Também foi observado que em vigas com armadura corroída a 3,25 % de perda de massa, o número de ciclos antes da ruptura foi reduzido para 626.000, já em vigas com 11,6 % de perda de massa, o número de ciclos suportado foi apenas de 89.000, o que indicaria a grande influência da corrosão da armadura em vigas submetidas a carregamentos cíclicos. A Figura 9 mostra as curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios do estudo de Yi et al. (2010). Pode-se perceber que, além da diminuição da resistência mecânica das vigas, também há a diminuição da capacidade de deformação das mesmas.

Figura 9 - Curvas Tensão-Deformação de diferentes tipos de corpos-de-prova

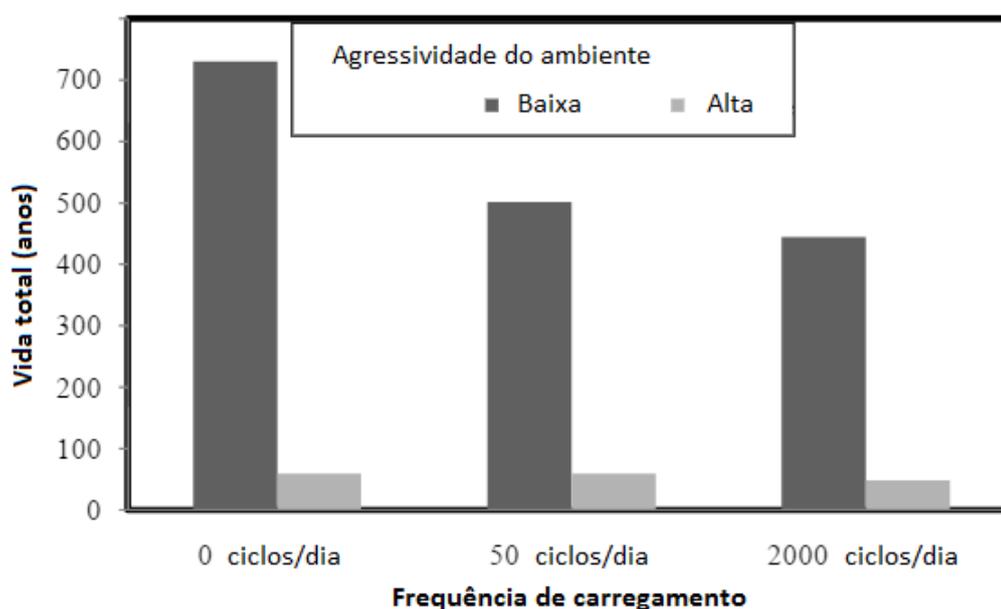


(fonte: YI et al, 2010)

Outro estudo que reforça o efeito corrosão-fadiga é o realizado por Coca et al. (2011). Neste estudo foram examinados elementos de pontes submetidos aos efeitos de corrosão, fadiga e corrosão-fadiga. Foi constatado que, quando combinados, os efeitos de fadiga e corrosão podem diminuir a resistência à fadiga em torno de 20 a 30 %.

Além de análises experimentais, um modelo probabilístico, para estruturas de concreto armado, que considera o efeito da corrosão e de carregamentos cíclicos na vida útil das armaduras, foi proposto por Bastidas-Arteaga et al. (2008). Esse modelo considerou diferentes frequências de carregamento e diferentes classes de agressividade. Os resultados concluíram que o nível de corrosão é mais influente do que a frequência de carregamento. A Figura 10 mostra a relação entre as frequências de carregamento e a agressividade do meio.

Figura 10 - Efeito da frequência de carregamento e da agressividade do ambiente na vida útil das estruturas de concreto armado



(fonte: BASTIDAS-ARTEAGA et al, 2008)

Através de um modelo matemático, os autores provaram que a mudança do meio de baixa agressividade para o meio com alta agressividade é de até catorze vezes mais influente do que as variações dos carregamentos.

Por sua vez, Shi e Zhang (2004) propuseram uma metodologia para avaliar os efeitos associados e desassociados de corrosão e fadiga, incluindo tanto os danos no aço, quanto os danos no concreto. O dano no concreto seria uma consequência do dano da armadura. O

estudo conclui que, quando considerados de maneira associada, os efeitos de corrosão e fadiga fazem com que a extensão do deslocamento aumente em 10 %.

Chen et al. (2005) também estudaram o assunto. Em uma série de experimentos realizados com um equipamento feito especialmente para os ensaios, capaz de simular efeitos de corrosão e fadiga simultaneamente, foi constatado que os corpos-de-prova submetidos a 60 dias de cura seguidos por 60 dias de imersão em solução corrosiva, perderam até 17,8 % de sua resistência à flexão. Por outro lado, os corpos-de-prova submetidos a 60 dias de cura seguidos por 60 dias de simulação de efeitos de corrosão e fadiga, perderam até 34,8 % de sua resistência à flexão.

Outra conclusão do estudo foi a importância da relação água/aglomerante. Segundo o estudo, além da relação influenciar a densidade estrutural, também influencia o desempenho anti-corrosivo do concreto. Quanto menor a relação água/aglomerante, melhor será a capacidade do concreto de suportar carregamentos alternados.

Apesar de alguns estudos se mostrarem promissores, em um âmbito geral, verificou-se que há uma grande dificuldade de simular em laboratório ambos os efeitos de corrosão e fadiga ocorrendo de maneira simultânea, como acontece na realidade.

Oyado et al. (2003) explica que ainda não existem métodos capazes de avaliar estruturas corroídas sujeitas a carregamentos cíclicos. Devido a esse fator, acredita-se que os resultados obtidos em laboratório são de menor intensidade quando comparados com situações reais. Surge, então, a necessidade de se realizar estudos mais aprofundados na área, com o intuito de melhorar a simulação do efeito corrosão-fadiga e tornar o ensaio mais próximo da realidade.

7 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo trata a respeito do programa experimental. Ao todo, foram moldadas oito vigas de dimensão 7 x 14 x 130 cm. As mesmas foram executadas em duas concretagens e separadas em dois grupos de controle, cada um deles composto por quatro vigas. Cada grupo de controle é formado por uma viga de concreto armado que serviu como testemunho, uma viga que foi induzida à corrosão, outra viga que foi submetida ao ensaio de fadiga e, por sua vez, a última viga foi submetida tanto os efeitos de corrosão, quanto os de fadiga. Todas elas foram rompidas através do ensaio de resistência a flexão, com a intenção de determinar a perda de resistência mecânica oriunda de cada situação. Também foram moldados seis corpos de prova cilíndricos, de diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, que foram submetidos ao ensaio de compressão aos 63 dias para controle da resistência à compressão do concreto utilizado na execução das vigas. Os materiais utilizados, preparação dos corpos de prova, a concretagem, o ensaio de corrosão acelerada e fadiga estão descritos ao longo do capítulo.

7.1 MATERIAIS

Antes de iniciar a preparação dos corpos de prova, é necessário descrever os materiais utilizados no programa experimental e suas características. Foram utilizados brita, areia e cimento na concretagem, além das barras de aço, utilizadas como armaduras positivas e negativas. Na sequência estão descritos os materiais utilizados para a moldagem das vigas.

7.1.1. Brita

A brita é considerada um agregado de tamanho graúdo, podendo ser oriunda do basalto ou do granito. Neste trabalho foi utilizada a brita basáltica. A Figura 11 mostra a brita separada e pesada antes do início da concretagem.

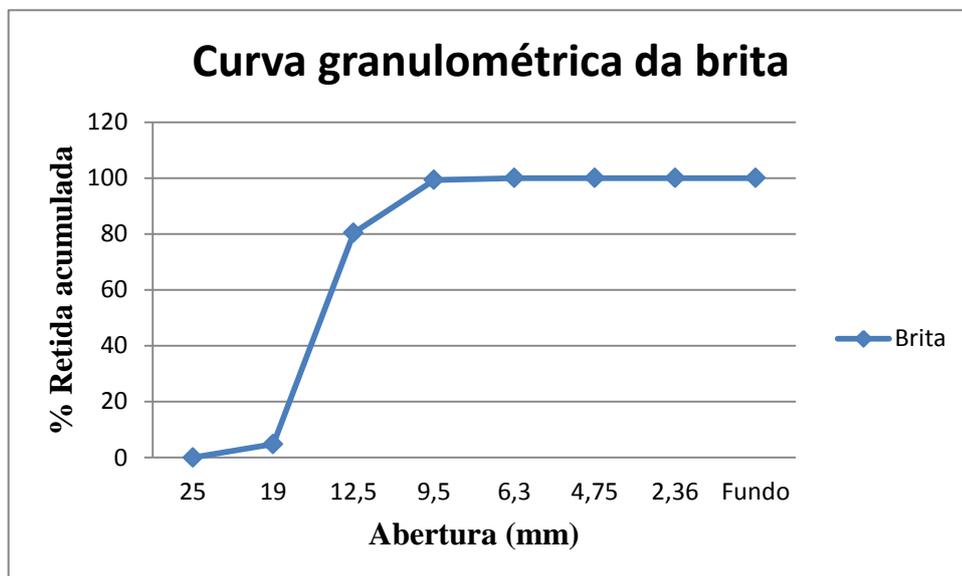
Figura 11 - Brita utilizada na concretagem das vigas



(fonte: foto do autor)

A curva granulométrica da brita está apresentada na Figura 12.

Figura 12- Curva granulométrica da brita



(fonte: elaborado pelo autor)

A Tabela 1 nos mostra algumas informações adicionais a respeito da composição granulométrica da brita.

Tabela 1 - Composição granulométrica da brita

Diâmetro Máximo Característico = 19 mm
Módulo de finura = 7,04
Massa específica = 2,90 g/cm³

(fonte: elaborado pelo autor)

7.1.2 Areia

Na concretagem das vigas, foi utilizada areia média, oriunda do Rio Jacuí. A Figura 13 mostra a areia separada e pesada antes do início da concretagem.

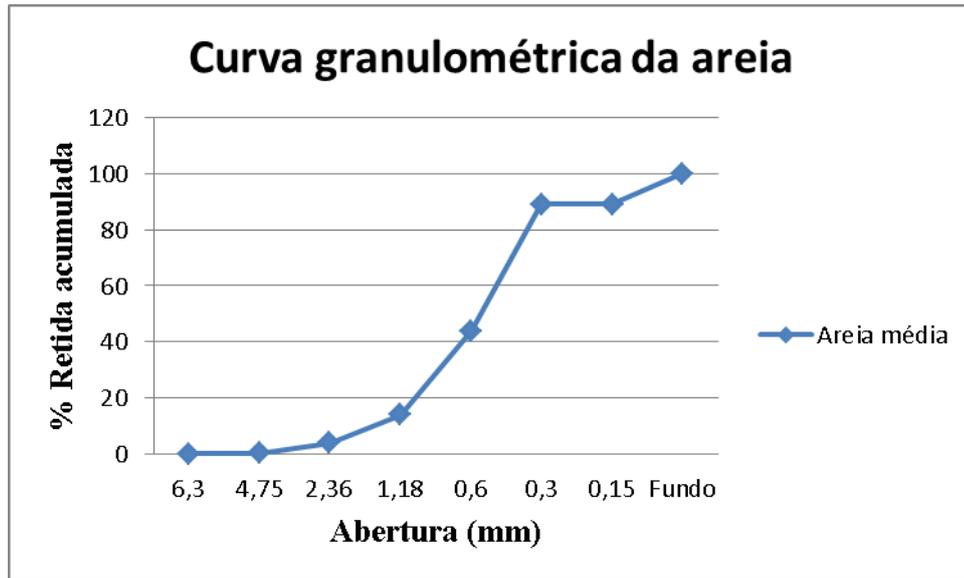
Figura 13 - Areia utilizada na concretagem das vigas



(fonte: foto do autor)

A curva granulométrica da areia está apresentada na Figura 14.

Figura 14- Curva granulométrica da areia média



(fonte: elaborado do autor)

A Tabela 2 nos mostra algumas informações adicionais a respeito da composição granulométrica da areia.

Tabela 2 - Composição granulométrica da areia

Diâmetro Máximo Característico = 2,36 mm
Módulo de finura = 2,40
Massa específica = 2,63 g/cm³
Umidade = 0,3%

(fonte: elaborado pelo autor)

7.1.3 Cimento

O cimento utilizado na concretagem das vigas foi o CP-V ARI, fabricado pela empresa Nacional. A Figura 15 mostra o cimento separado e pesado antes do início da concretagem.

Figura 15 - Cimento utilizado na concretagem das vigas



(fonte: foto do autor)

A Tabela 3 mostra as características do material.

Tabela 3 - Características do CP-V ARI da empresa Nacional

Área específica - Blaine (m²/g)	0,4401	≥ 0,3	NM 76/98
Tempo de pega			NM 65/02
Início (min)	140	≥ 60	
Término (min)	187	≤ 600	
Massa específica (g/cm³)	3,11	-	NM 23/01
Diâmetro médio (µm)	11,06		
Perda ao fogo (%)	2,56	≤ 4,5	NM 18/04
SiO₂ (%)	17,83		

(fonte: elaborado pelo autor)

7.1.4 Barras de aço

Para a execução das armaduras foram utilizadas barras de aço doadas pela empresa ArcelorMittal. Como armadura positiva, foram utilizadas duas barras de aço CA-50 de 8 mm

de diâmetro. Essas barras possuem comprimento reto de 127 cm e ganchos de 10 cm. Para amarração dos estribos foram utilizadas duas barras de aço CA-60 de 5 mm de diâmetro, ambas possuem 127 cm de comprimento e não exercem nenhuma função estrutural. Para concluir, os estribos utilizados foram de aço CA-60 e possuíam 5 mm de diâmetro. Suas dimensões eram 5 cm de largura e 11 cm de altura. Os estribos foram amarrados nas armaduras longitudinais utilizando arame queimado número 18. É possível observar as barras utilizadas na Figura 16.

Figura 16 - Barras utilizadas como armadura positiva, negativa e estribos



(fonte: foto do autor)

7.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Uma vez que definidos os materiais utilizados, a próxima etapa é o início do programa experimental. Esse capítulo descreve a preparação dos corpos de prova que foram ensaiados, através da configuração da montagem das armaduras, a escolha do traço e a concretagem propriamente dita.

7.2.1 Montagem das armaduras

As armaduras foram montadas de acordo com a Figura 17.

Figura 17 - Configuração da armadura



(fonte: foto do autor)

A montagem iniciou com a separação dos materiais e a organização da bancada de trabalho, como mostra a Figura 18. Os equipamentos utilizados foram uma trena e giz para marcar o espaçamento dos estribos, uma chave inglesa para prender os estribos na hora da amarração dos mesmos e uma torçezca para amarrar e cortar o arame queimado.

Figura 18 - Equipamentos utilizados na montagem da armadura



(fonte: foto do autor)

Após a marcação dos lugares dos estribos, iniciou-se a amarração dos mesmos às barras de aço de 8 mm. Primeiramente, foram amarrados todos os estribos de uma das barras, e

posteriormente, os estribos das barras de mesmo diâmetro seguinte. Concluída essa parte da amarração, inverteu-se de cabeça para baixo a armadura e foi executada a amarração das barras de 5 mm de diâmetro, seguindo o mesmo passo-a-passo, como pode ser observado na Figura 19.

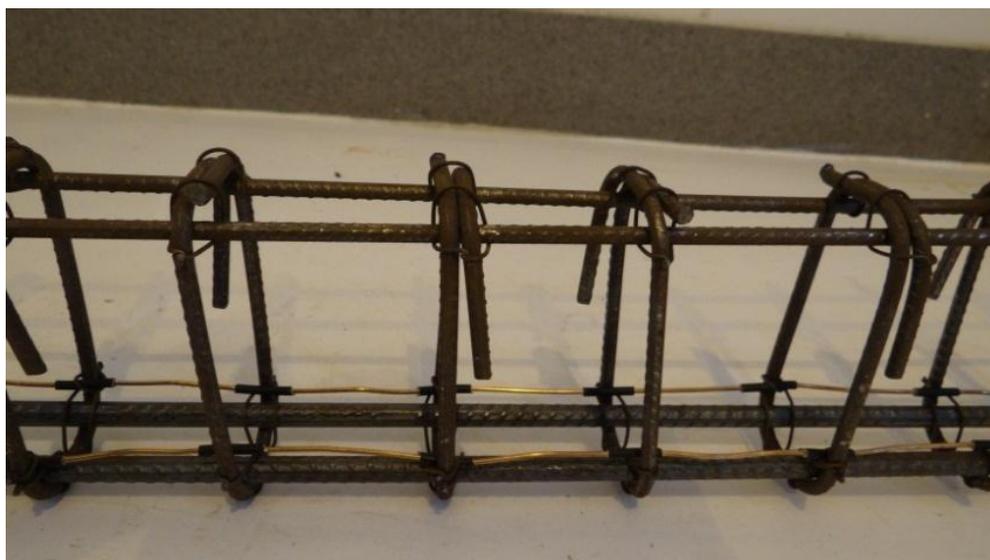
Figura 19 - Armadura após término da montagem



(fonte: foto do autor)

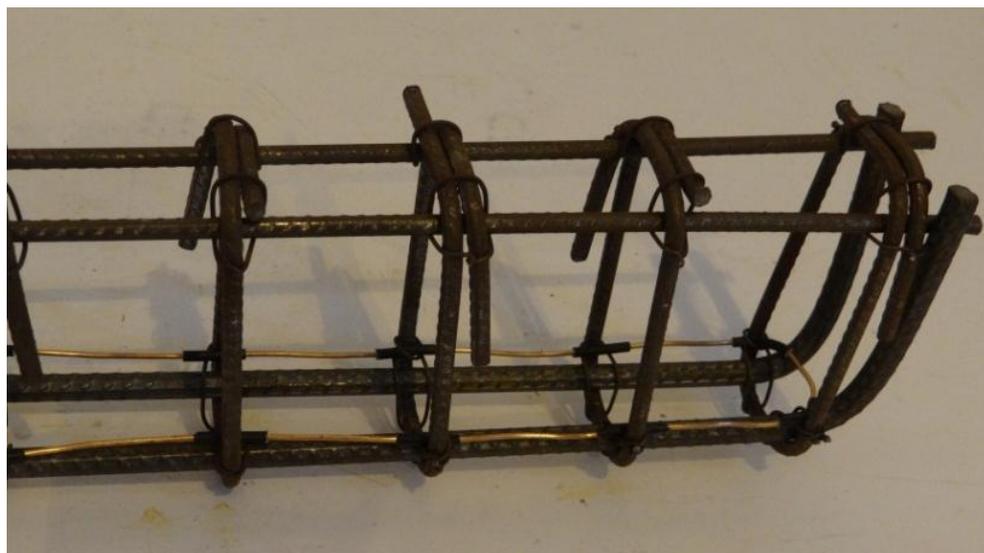
Uma vez terminada a montagem das armaduras, foi posicionado um fio de cobre em cima das duas barras que seriam submetidas à corrosão, no caso, as barras de aço CA-50, de 8 mm de diâmetro, para garantir a diferença de potencial elétrico necessária para a realização do ensaio CAIM. Tomou-se o cuidado de evitar o contato entre o fio de cobre, de espessura 2,5 mm, e as barras. As Figuras 20 e 21 mostram a configuração final das armaduras com o fio de cobre posto logo acima das mesmas.

Figura 20 - Armadura com o fio de cobre posicionado em cima da mesma



(fonte: foto do autor)

Figura 21 - Detalhe do canto da armadura



(fonte: foto do autor)

Concluída a montagem das armaduras, foram posicionados os espaçadores de 1,5 x 1 x 7 cm de dimensão, feitos de cimento e areia, dentro das formas, feitas de chapas de compensado plastificado e já preparadas com desmoldante. Os espaçadores são mostrados na Figura 22 e as formas, na Figura 23.

Figura 22 - Espaçadores de cimento e areia



(fonte: foto do autor)

Figura 23 - Formas preparadas com desmoldante



(fonte: foto do autor)

Para concluir, antes de iniciar a concretagem, as armaduras foram posicionadas dentro das formas, como mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Armaduras posicionadas e prontas para concretagem



(fonte: foto do autor)

7.2.2 Traço e concretagem

Optou-se por trabalhar com um concreto de 25 MPa de resistência à compressão. O traço utilizado foi baseado nos estudos realizados por Graeff (2007). A Tabela 4 mostra o traço escolhido.

Tabela 4 - Traço utilizado na concretagem

Concreto	Cimento	Areia	Brita	Relação a/c
25 MPa	1	2,9	3,6	0,66

(fonte: elaborado pelo autor)

Levando em consideração o traço utilizado, foi calculado o volume de concreto para duas concretagens, cada uma para moldar 4 vigas de dimensão 7 x 14 x 130 cm e 3 corpos de prova cilíndricos de 20 cm de altura e 10 de diâmetro.

As duas concretagens foram realizadas no LEME. Os materiais foram misturados na seguinte sequência: água, brita, cimento, areia e, por fim, o restante da água. A Figura 25 mostra a betoneira de 400 litros e eixo horizontal utilizada para fazer a mistura. O tempo de mistura foi

baseado em inspeção visual, isto é, até que a mistura estivesse consistente e homogênea. Após o término da concretagem, foi executado o ensaio de abatimento de tronco de cone.

Figura 25 - Betoneira utilizada na concretagem



(fonte: foto do autor)

As Figuras 26 e 27 evidenciam o equipamento utilizado e o ensaio de tronco de cone realizado, respectivamente. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de abatimento

	Ensaio de abatimento (Slump test)
Concretagem 1 (08/09/2016)	19 cm
Concretagem 1 (09/09/2016)	18 cm

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 - Equipamento utilizado no ensaio de abatimento



(fonte: foto do autor)

Figura 27 - Ensaio de abatimento



(fonte: foto do autor)

Após o término da mistura, foram moldadas as vigas para o ensaio e os corpos de prova para controle da resistência do concreto. As vigas foram adensadas com vibrador de imersão e os corpos de prova cilíndricos vibrados na mesa vibratória. A Figura 28 apresenta o momento da vibração das vigas. Concluído o adensamento, os corpos de prova foram deixados em processo de cura durante 3 dias, sendo molhados duas vezes ao dia. As Figuras 29 e 30

revelam as vigas e os corpos de prova cilíndricos logo após a concretagem. Passado esse período, as vigas e os corpos de prova cilíndricos foram desformados e separados em dois grupos, de acordo com o processo de cura dos mesmos. Os corpos de prova cilíndricos foram curados em imersão aquosa e as vigas submetidas à cura úmida, sendo envolvidas em manta de geotêxtil e molhadas uma vez ao dia, durante 28 dias, conforme mostra a Figura 31.

Figura 28 - Adensamento das vigas



(fonte: foto do autor)

Figura 29 - Vigas após adensamento e desempeno da superfície



(fonte: foto do autor)

Figura 30 - Corpos-de-prova após vibração e desempenho



(fonte: foto do autor)

Figura 31 - Vigas envolvidas pelo geotêxtil



(fonte: foto do autor)

Uma vez concluída essa etapa, iniciou-se o processo de corrosão acelerada nas devidas vigas, conforme descrito a seguir.

7.3 CORROSÃO ACELERADA

De acordo com Graeff (2007), todo ensaio acelerado distorce as condições de agressividade, fazendo com que seja mais difícil correlacionar as condições de ensaio com as condições

naturais, e praticamente impossibilita a estimativa de vida útil a partir da análise de tempos de ensaio.

Considerando as limitações de tempo para realizar os ensaios, o tempo consumido para desencadear o processo corrosivo naturalmente e o conhecimento já adquirido pelo laboratório através da realização de experimentos anteriores, optou-se pelo método CAIM para conseguir a indução eletroquímica e assim iniciar e propagar a corrosão da armadura. O ensaio propõe a imersão parcial do corpo de prova em uma solução repleta de íons de cloretos. Esses íons de cloreto acabam migrando da solução para as barras da armadura através da aplicação de estímulos elétricos e iniciam o processo corrosivo.

Após a definição do método, tornou-se necessária a escolha de alguns parâmetros. Determinou-se que seria mantida a mesma taxa de corrente constante utilizada nos ensaios de Graeff (2007), com o intuito de realizar um maior controle sobre o grau de corrosão. A corrente mantida é de $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Tendo em vista que as barras a serem corroídas são barras de 8 mm de diâmetro e 127 cm de comprimento, obtém-se que a corrente constante que deve ser aplicada no sistema deve ser de 320 mA. Além disso, também foi decidido que seriam misturados 35 g de sal de cozinha (NaCl) por litro d'água, formando assim uma solução de cloretos parcialmente similar a concentração encontrada no Oceano Atlântico.

Definidos esses parâmetros, foi possível iniciar os ensaios. A Figura 32 mostra a configuração geral do mesmo, onde é mostrada a fonte para aplicar a corrente constante e as vigas durante o ensaio.

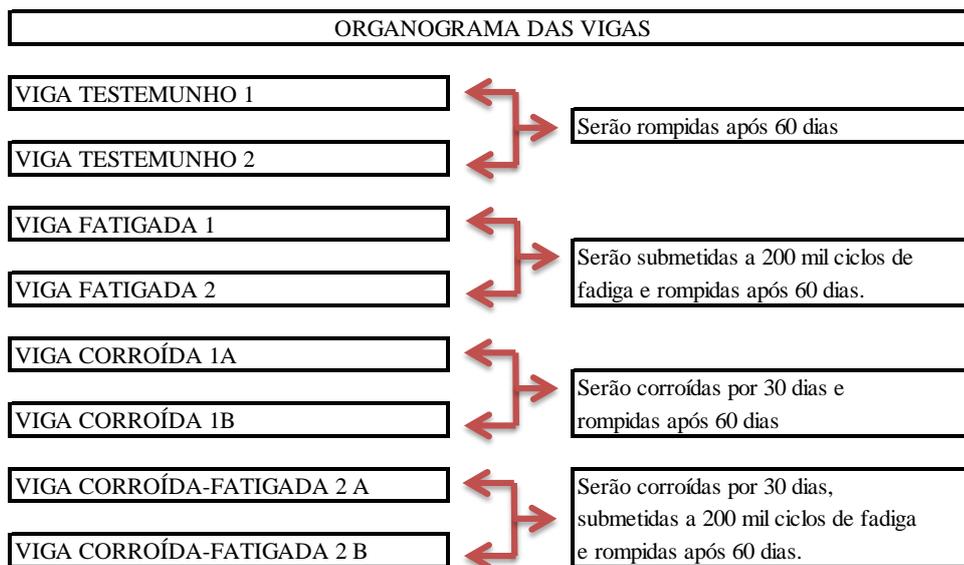
Figura 32 - Configuração geral do ensaio



(fonte: foto do autor)

A Figura 33 mostra o organograma que será seguido no decorrer do ensaio. Serão corroídas somente quatro das oito vigas. Dentre as 4 vigas restantes, tem-se duas vigas que servirão de testemunho e duas que serão submetidas somente ao ensaio de fadiga. Salienta-se que, conforme descrito no início do capítulo anterior, foram utilizados dois grupos de controle, oriundos de duas concretagens distintas. Os códigos 1 e 2 no organograma abaixo se referem a estes dois grupos de controle e as letras A e B às porcentagens de perda de massa.

Figura 33 - Organograma das vigas ensaiadas

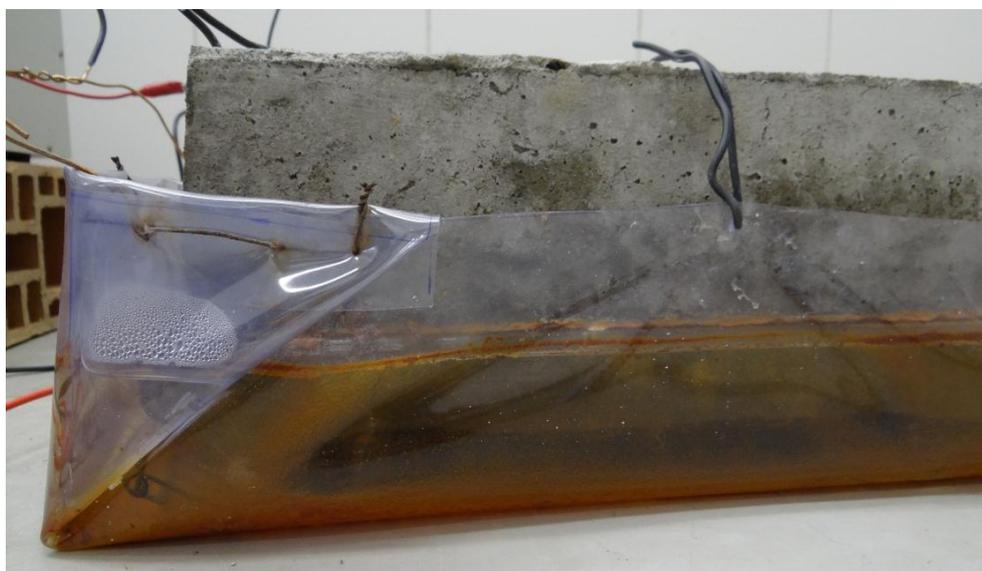


(fonte: elaborado pelo autor)

Para dar início ao experimento de aceleração da corrosão, foram montadas quatro piscinas com a solução de cloretos. Utilizaram-se espaçadores para evitar o contato da viga com o plástico, fazendo com que não houvesse risco da piscina furar devido ao manuseio das vigas, além de garantir que a face inferior da viga ficasse totalmente exposta à solução.

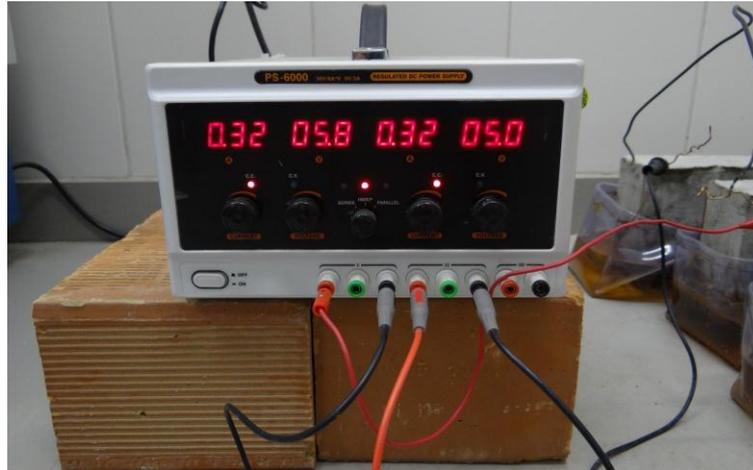
Após a colocação das quatro vigas nas piscinas, as mesmas foram cheias até uma altura aproximada de 5 cm de solução com íons cloretos, pois a lâmina da solução precisava ultrapassar a barra de 8 mm localizada dentro da viga. O fio de cobre, detalhado no capítulo 7.2, que ficava logo acima da armadura positiva e que foi concretado junto com a mesma, foi conectado ao polo positivo da fonte, com o intuito de atuar como ânodo no processo eletroquímico. Outro fio de cobre que foi posto ao redor da viga e imerso na solução foi ligado ao polo negativo da fonte e fará o papel de cátodo. As Figuras 34 e 35 mostram, respectivamente, os produtos de corrosão formados e dissolvidos na solução e a fonte já calibrada.

Figura 34 - Produtos de corrosão formados e dissolvidos na solução



(fonte: foto do autor)

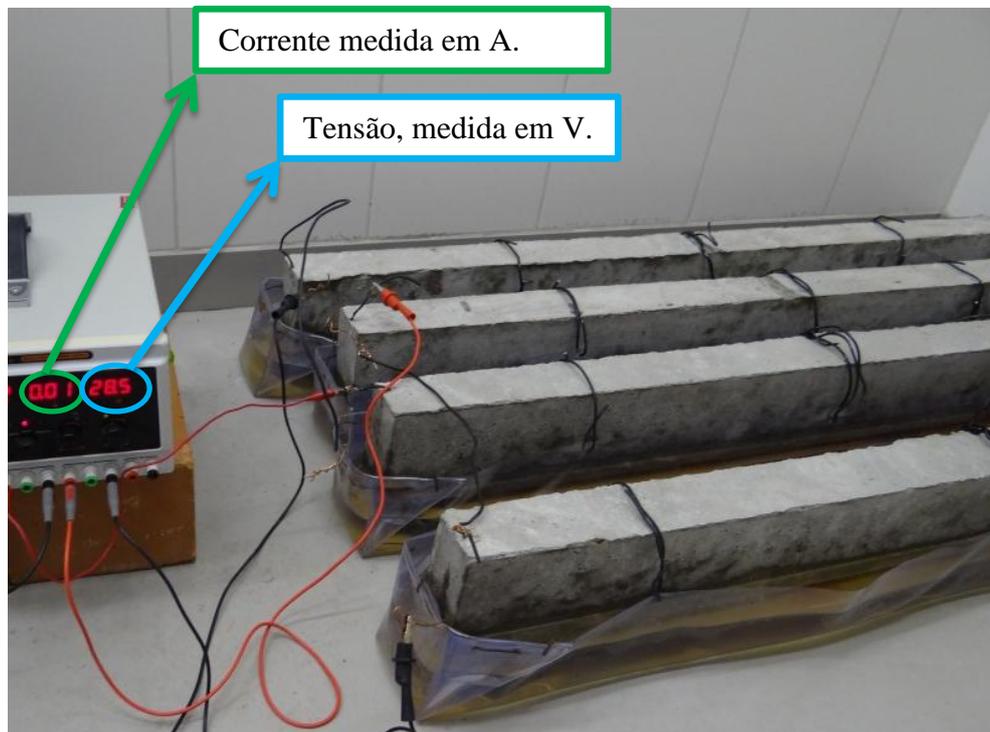
Figura 35 - Fonte calibrada com 320 mA de corrente contínua



(fonte: foto do autor)

Inicialmente, as vigas foram ligadas em série, com uma corrente contínua de 320 mA, permitindo com que a diferença de potencial variasse de acordo com a resistência das vigas. No entanto, após 3 dias de ensaio, observou-se que a corrente de 320 mA tinha baixado para o valor de 10 mA. A Figura 36 mostra a corrente com valor reduzido no visor da esquerda e a tensão, em volts no visor da direita.

Figura 36 - Redução da corrente

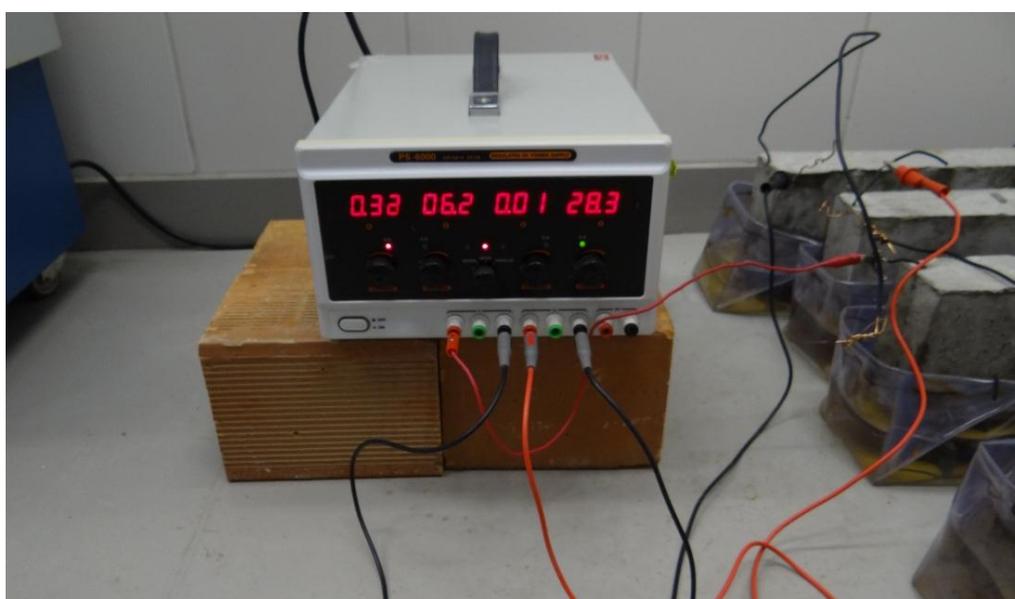


(fonte: foto do autor)

Acredita-se que os prováveis motivos que ocasionaram essa diminuição da corrente sejam a colmatação do concreto, devido à passagem dos íons cloreto, dispersos na solução, para o interior do concreto, em direção às barras que estavam sendo corroídas e a falta de oxigenação do concreto de cobertura das vigas. Depois de observada essa situação, as quatro vigas continuaram sendo monitoradas.

Transcorrida uma semana de ensaio, as vigas foram testadas individualmente, e então, percebeu-se que das quatro vigas, duas estavam permitindo a passagem da corrente pré-estabelecida de 320 mA, sendo uma delas da primeira concretagem e outra da segunda. Optou-se então por colocar em série as vigas que permitiam a passagem dessa corrente. As demais vigas que ofereciam maior resistência à passagem de corrente continuaram ligadas em série e em outra fonte, com corrente de apenas 10 mA. A Figura 37 mostra a disposição final das vigas e suas respectivas fontes (o equipamento mostrado na imagem é na verdade duas fontes independentes).

Figura 37 - Vigas separadas de acordo com a resistência à corrente elétrica

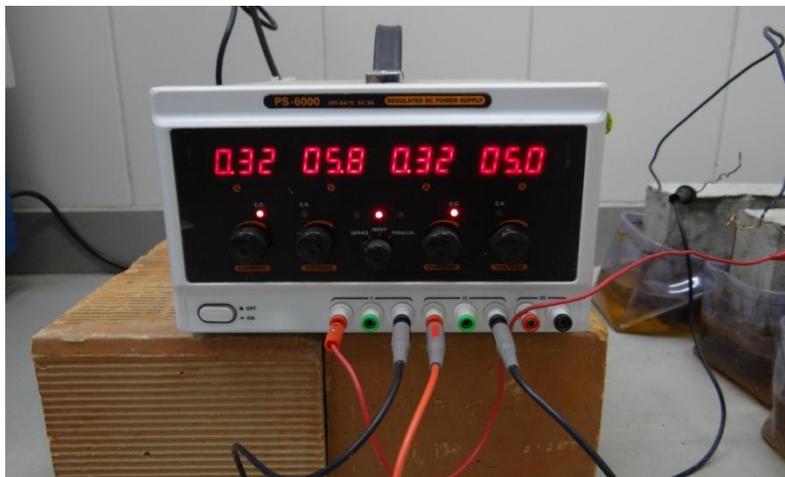


(fonte: foto do autor)

Na semana seguinte, as duas vigas que não estavam permitindo a passagem da corrente pré-estabelecida de 320 mA voltaram a apresentar menos resistência e a passagem da corrente anterior foi reestabelecida, no entanto, por motivos de falta de calibração das fontes, as vigas foram expostas a uma corrente elevada de 4.100 mA durante um período de 2 dias, o que mais

tarde explicaria o motivo delas apresentarem uma perda de massa maior que as vigas anteriores. A Figura 38 mostra a fonte e a calibração final da mesma.

Figura 38 - Calibração final da fonte



(fonte: foto do autor)

O tempo de duração do ensaio de corrosão foi baseado nos estudos realizados por Graeff (2007), ficando determinado que o tempo necessário para atingir 10% de perda de massa seria de aproximadamente 30 dias. No entanto, devido à dificuldade de passar a corrente pré-estabelecida nas 4 vigas durante a primeira semana e em 2 dessas 4 vigas na segunda semana, acredita-se que a porcentagem da perda de massa devido ao efeito de corrosão deve ser um pouco menor. As Figuras 39 e 40 mostram as vigas corroídas no final do ensaio.

Figura 39 - Viga após o ensaio de corrosão acelerada



(fonte: foto do autor)

Figura 40 - Produtos do ensaio de corrosão acelerada



(fonte: foto do autor)

Finalizado o ensaio de corrosão acelerada e tendo em vista que os corpos de prova já tinham idade superior a 60 dias, pode-se avançar para a próxima etapa, que está descrita a seguir.

7.4 ENSAIOS PRELIMINARES

Com o término do ensaio de corrosão, foi necessário descobrir a resistência à flexão dos testemunhos e de 2 das 4 vigas corroídas. A Figura 41 mostra as vigas testemunhos e as vigas corroídas selecionadas. A obtenção da resistência à flexão estática destes corpos de prova é necessária para a realização do ensaio de fadiga, tendo em vista que ao realizar o ensaio, é necessário aplicar um carregamento cíclico em função da carga máxima de ruptura estática.

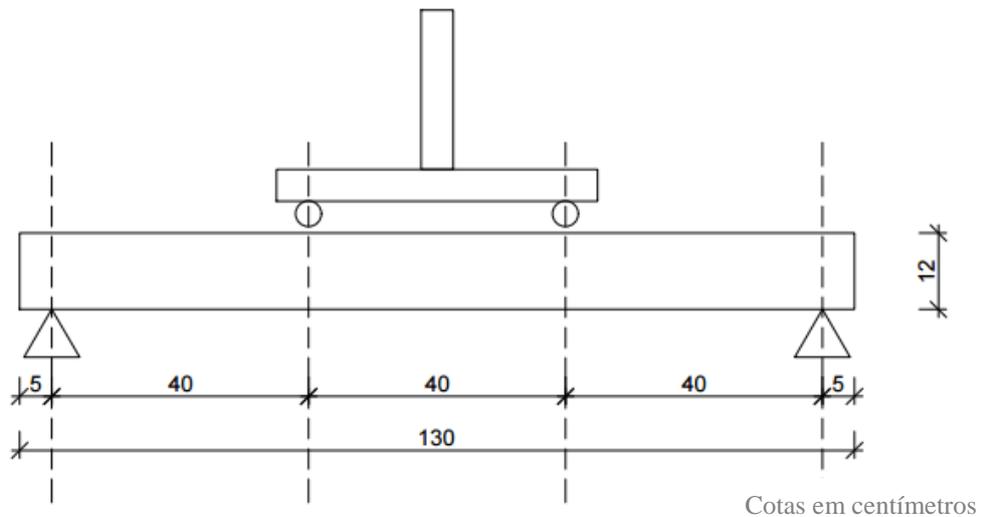
Figura 41 - Vigas submetidas ao ensaio de flexão a 4 pontos



(fonte: foto do autor)

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados considerando a configuração em quatro pontos, conforme mostrado nas Figuras 42, 43 e 44. Foi utilizado um relógio comparador para obtenção dos deslocamentos provocados pelos diferentes carregamentos. As vigas foram carregadas de 5 em 5 kN.

Figura 42 - Configuração do ensaio de flexão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 43- Ensaio de flexão a 4 pontos



(fonte: foto do autor)

Figura 44 - Relógio comparador usado para medir o deslocamento provocado pelo carregamento



(fonte: foto do autor)

Os carregamentos que ocasionaram a ruptura dos testemunhos foram de 40 kN e 39,4 kN. Optou-se por trabalhar com a média aritmética dos valores obtidos, sendo de 39,7 kN o carregamento que servirá de base para o ensaio de fadiga.

Em seguida, foram ensaiadas as vigas corroídas. Optou-se por ensaiar uma viga corroída com uma corrente de 10 mA por uma semana e de 320 mA por 3 semanas, e outra viga corroída com uma corrente de 10 mA por 2 semanas e de 320 mA por 2 semanas. A primeira viga (10 mA por uma semana e 320 mA por 3 semanas) apresentou perda de massa da armadura de aproximadamente 9% e rompeu com uma carga de 37,6 kN. A Figura 45 apresenta esta viga rompida no ensaio de flexão.

Figura 45 - Rompimento da viga com 9% de perda de massa da armadura



(fonte: foto do autor)

A outra viga ensaiada (10 mA por duas semanas e 320 mA por duas semanas) apresentou perda de massa superior à primeira, sendo ela de aproximadamente 14%. A carga de ruptura, se comparada com a viga corroída anterior, foi menor, suportando 34,5 kN. A Figura 46 mostra a viga rompida e a Figura 47 revela o deslocamento do cobrimento provocado pela corrosão.

Figura 46 - Rompimento da viga com 14% de perda de massa da armadura



(fonte: foto do autor)

Figura 47 - Deslocamento do cobrimento provocado pela corrosão



(fonte: foto do autor)

Salienta-se que as porcentagens de perda de massa apresentadas para as vigas corroídas foram determinadas após o rompimento dos testemunhos e das vigas corroídas. A Figura 48 mostra as 4 vigas rompidas.

Figura 48 - Vigas rompidas e carga de ruptura (kgf)



(fonte: foto do autor)

Para determinação da perda de massa, foram retirados dois fragmentos de 50 cm de comprimento da armadura longitudinal positiva de cada viga ensaiada. O trecho escolhido foi

no centro do vão para que fosse considerada justamente a armadura mais solicitada. Após a retirada das barras, as mesmas foram limpas com solução de hexametileno tetramina, de acordo com a ASTM G1-03 (2003). As Figuras 49, 50 e 51 mostram, respectivamente, a retirada das barras do terço médio da viga, as barras com produtos corrosivos e as barras após limpeza com a solução ácida. Terminada a limpeza das barras, o tamanho das mesmas foi padronizado e a pesagem das barras foi feita. As porcentagens de perda de massa foram baseadas em valores médios, servindo o peso das barras de uma viga testemunho como referência.

Figura 49 - Retirada das barras de 8 mm dos corpos-de-prova



(fonte: foto do autor)

Figura 50 - Barras com produtos de corrosão



(fonte: foto do autor)

Figura 51 - Barras após limpeza com solução ácida



(fonte: foto do autor)

Determinadas as cargas de ruptura das vigas ensaiadas, foi possível calcular o carregamento necessário para realização do ensaio de fadiga, considerando um nível de tensão pré-estabelecido.

7.5 ENSAIO DE FADIGA

É importante salientar que o ensaio de fadiga no concreto é realizado considerando uma fração da resistência estática e é influenciado pela amplitude de variação das tensões e pelo número de ciclos. Após o rompimento dos testemunhos apresentado no capítulo anterior, foi determinado que o carregamento máximo no ensaio de fadiga seria equivalente a 50% da carga de ruptura dos testemunhos já ensaiados (e conseqüentemente um carregamento proporcionalmente maior para as vigas corroídas, que tiveram carga de ruptura menor que as vigas testemunho).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS. O laboratório apresenta excelente infraestrutura, favorecendo assim a caracterização de materiais de engenharia, bem como a realização de testes mecânicos ao ar ou em meios corrosivos, simulações de processos via elementos finitos e ensaios não destrutivos.

O equipamento utilizado no ensaio foi calibrado para que a viga fosse submetida a um carregamento máximo de 20 kN (50% da carga de ruptura da viga testemunho) e a frequência

determinada de acordo com o tempo que a viga levaria para voltar a sua forma inicial. Em princípio, cada viga seria submetida a 200.000 ciclos, ou até alguma das vigas apresentarem fissuras que poderiam comprometer o ensaio de flexão. Por ser um experimento inovador, onde não existe um banco de dados que mostre a influência de vigas corroídas submetidas à fadiga, optou-se por um número máximo de ciclos conservador, uma vez que se sabe que obras de infraestrutura viária como pontes e viadutos são normalmente submetidos a número de ciclos bem mais elevados. De acordo com trabalho de Meneghetti (2007), vigas da mesma dimensão, com armadura e concreto semelhante, e submetidas somente aos ensaios de fadiga resistiram entre 194.514 e 383.554 ciclos de fadiga, quando aplicada uma variação 8 – 61% da carga última estimada, sendo a carga mínima de 2,8 kN e máxima de 22,4 kN. Essa abordagem conservadora foi justamente para tentar evitar a perda (através da ruptura) do corpo de prova durante o ensaio de fadiga, que impedisse o ensaio de resistência à flexão estática residual. É importante salientar que foram ensaiadas duas vigas que já apresentavam armadura corroída, a princípio com os graus de 9% e 14% de perda de massa, e duas vigas que não apresentavam manifestação patológica alguma.

As Figuras 52 e 53 mostram o equipamento para simulação da fadiga e as vigas sendo ensaiadas.

Figura 52- Ensaio de fadiga - vista frontal



(fonte: foto do autor)

Figura 53- Ensaio de fadiga - vista lateral



(fonte: foto do autor)

A frequência utilizada no ensaio foi de 5 Hz, a variação de tensão foi de 50 – 5% da tensão de ruptura dos testemunhos, sendo o carregamento máximo no valor de 20 kN (correspondente a aproximadamente 50% da carga de ruptura estática dos testemunhos e 58% e 53% da carga de ruptura estática das vigas corroídas com 14 e 9% de perda de massa, respectivamente) e mínimo de 2 kN.

As duas vigas corroídas foram ensaiadas até um número de ciclos inferior a 200.000. A viga com perda de massa de 9% foi submetida a 177.000 ciclos, enquanto a viga que apresentou perda de massa de 14% foi submetida a 166.000 ciclos. Ambas apresentaram aumento de deslocamentos permanentes e fissuras durante o ensaio de fadiga, indicando que a ruptura estava próxima. De maneira a evitar a ruptura dos corpos de prova, o ensaio foi interrompido. Concluídos os ensaios, as vigas foram levadas para o LEME e lá ensaiadas estaticamente até seu rompimento, conforme mostram as Figuras 54 e 55.

Figura 54 - Ensaio de flexão a quatro pontos de uma das vigas fatigadas



(fonte: foto do autor)

Figura 55 - Ensaio de flexão de umas das vigas corroídas e fatigadas



(fonte: foto do autor)

Uma vez que se obtiveram as cargas de ruptura e os deslocamentos verticais das quatro vigas restantes, tornou-se possível a obtenção do gráfico carga x deslocamento com todos os resultados obtidos (incluindo as vigas dos ensaios preliminares, não fatigadas). O próximo capítulo tratará sobre os resultados obtidos.

8 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os resultados dos ensaios realizados e a interpretação dos efeitos de corrosão, fadiga e corrosão- fadiga nas vigas de concreto armado ensaiadas.

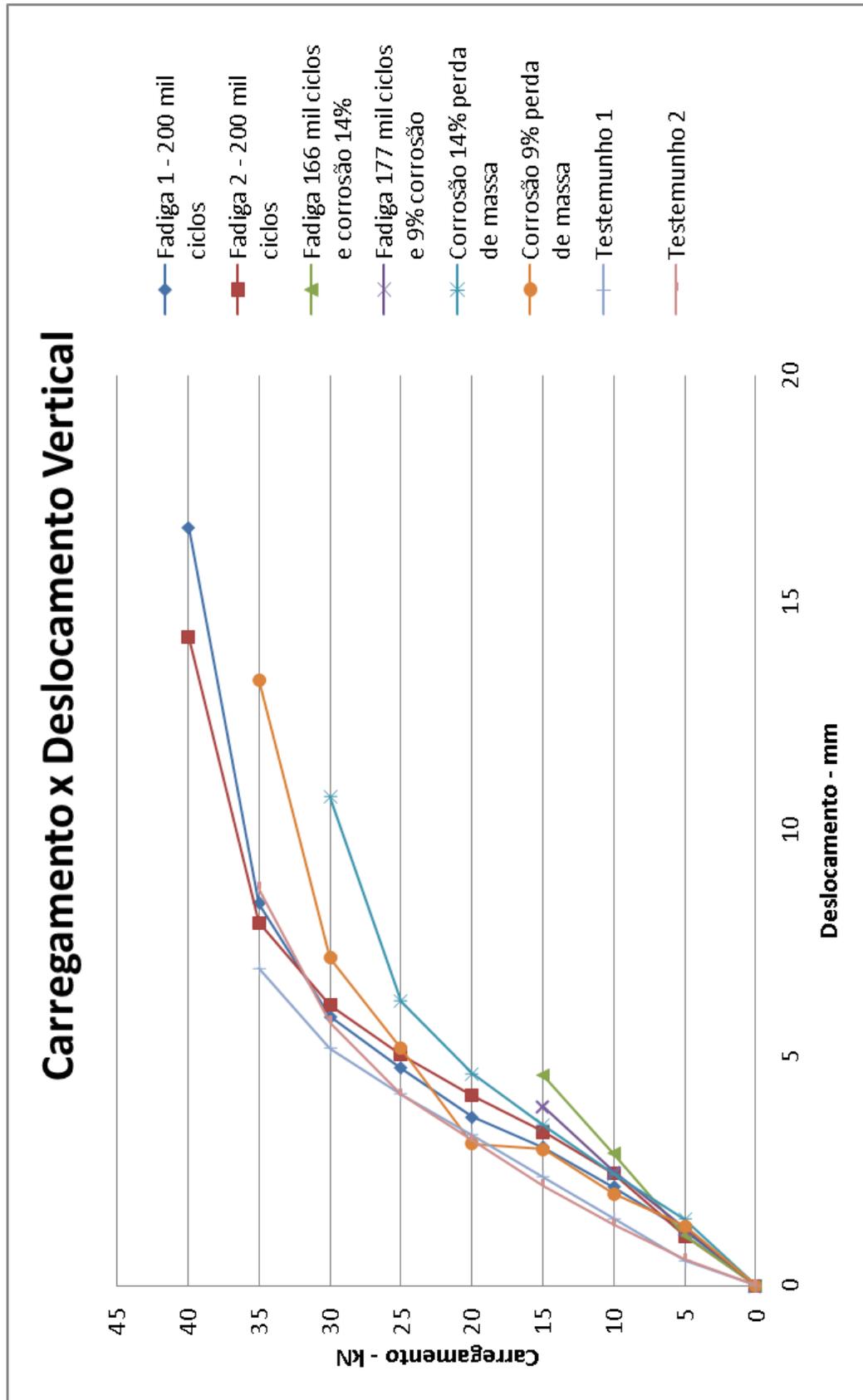
Após o término de todos os ensaios, tornou-se possível a elaboração do gráfico apresentado na Figura 56. No gráfico é possível perceber que ambos os testemunhos apresentaram um comportamento muito semelhante.

O gráfico mostra a drástica redução da carga de ruptura, quando se comparam as vigas submetidas somente ao ensaio de fadiga com as vigas que sofreram ambos os efeitos de fadiga e corrosão. Pode-se perceber também, que além da perda de resistência mecânica, as vigas apresentaram flechas maiores quando submetidas ao mesmo carregamento, o que acontece possivelmente devido à perda de seção transversal pelo processo corrosivo, falta de aderência entre o aço e o concreto, fissuração do concreto e fragilização do aço.

Quando se comparam as vigas fatigadas com as vigas testemunhos, observa-se um comportamento muito semelhante. No entanto, as vigas fatigadas apresentaram um leve aumento na flecha, o que seria explicado pela aplicação dos 200.000 ciclos durante o ensaio de fadiga, que pode ter diminuído a aderência entre o aço e o concreto, além de ter provocado pequenas fissuras não visíveis no concreto.

Quando se observa as vigas corroídas se percebe que a diminuição da capacidade de suporte de carga em comparação com as vigas testemunho é bastante pequena, apesar de se perceber um aumento dos deslocamentos. Esse aumento dos deslocamentos pode ser devido à perda de aderência entre a barra de armadura e o concreto, além de outros fatores como a fragilização do aço, redução da seção transversal, entre outros. Constatou-se também que a viga com perda de massa de 14% rompeu antes da viga com perda de massa de 9%, provavelmente devido às tensões de tração provocadas pelos produtos expansivos da corrosão que afetaram mais drasticamente o concreto de cobertura da mesma, além de uma maior redução da seção transversal e conseqüentemente menor capacidade de sustentação.

Figura 56 - Gráfico Carregamento x Deslocamento (testemunhos, vigas fatigadas, vigas corroídas e vigas corroídas e fatigadas)

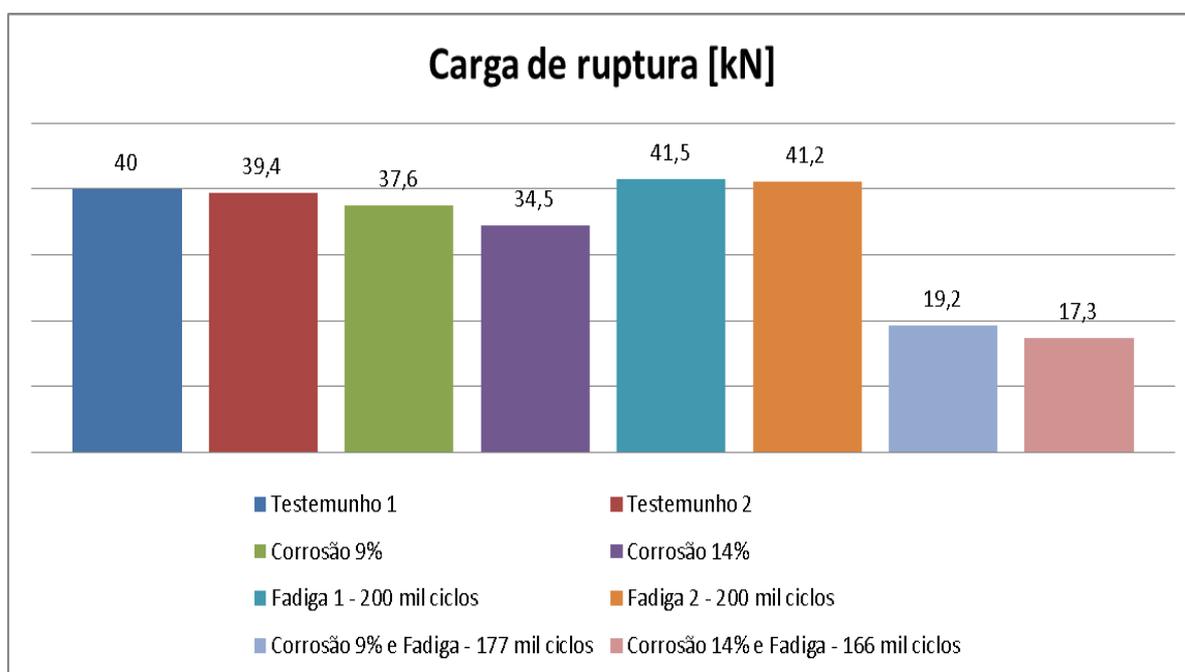


(fonte: elaborado pelo autor)

O acréscimo na flecha é mais pronunciável em carregamentos mais elevados, próximo da ruptura. Entretanto, é notável que quando efeitos cíclicos são adicionados nas vigas já corroídas, o aumento dos deslocamentos acontece inclusive para cargas bem baixas, mostrando uma redução da rigidez da viga e plasticidade mesmo para pequenos carregamentos.

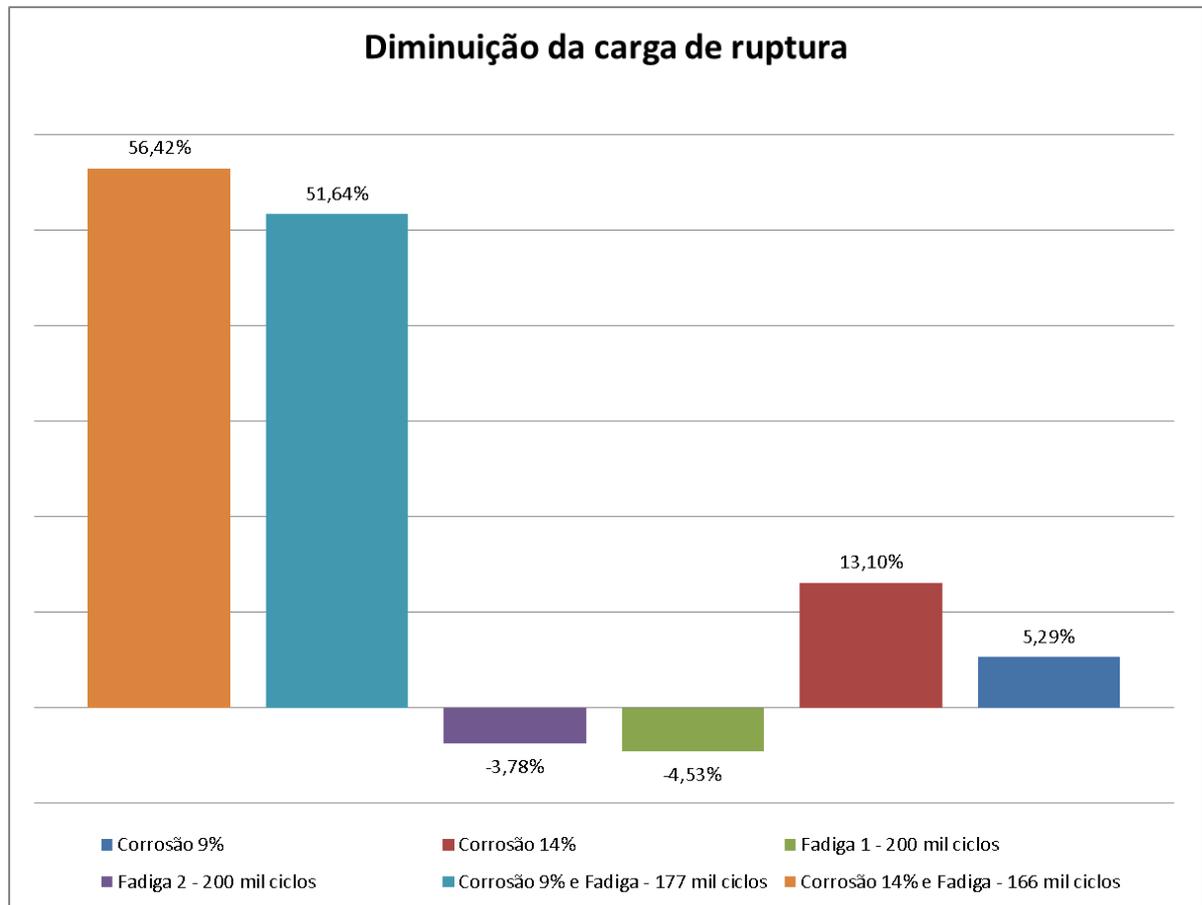
A Figura 57 mostra a carga de ruptura de todas as vigas ensaiadas, já a Figura 58 revela a diminuição da carga de ruptura das vigas quando comparadas a média da carga de ruptura dos testemunhos.

Figura 57 - Carga de ruptura das vigas ensaiadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 58 - Diminuição da carga de ruptura em comparação a média da carga de ruptura dos testemunhos



(fonte: elaborado pelo autor)

Pode-se dizer então, que há um efeito sinérgico que influencia na capacidade de carga das vigas em concreto armado. Esse efeito combinado não pode ser desconsiderado, pois representa uma queda maior que 50% da capacidade portante dos elementos estudados, considerando as premissas analisadas nesta pesquisa, que contribuem para que seja obtido um cenário extremo, possibilitando assim uma maior compreensão da magnitude dos efeitos combinados de fadiga e corrosão.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios realizados ao longo deste trabalho mostraram que as vigas fatigadas tiveram comportamento semelhante às vigas testemunho, apesar de apresentar um deslocamento vertical mais acentuado provavelmente devido à diminuição de aderência entre o aço e o concreto e a possíveis microfissuras desenvolvidas pela aplicação das cargas cíclicas. Quando se comparam as vigas testemunho com as vigas corroídas, tanto a vida com 9%, quanto a viga de 14% de perda de massa, observa-se que a carga de ruptura diminui um pouco em ambos os casos, no entanto o deslocamento vertical da viga com perda de massa de 9% aumenta em torno de 40% e o deslocamento vertical da viga com perda de massa de 14% aumenta 27%. Esse aumento pode ser justificado devido à perda de seção transversal, perda de aderência entre aço e concreto e deterioração do concreto de cobertura. Por outro lado, as vigas que foram submetidas a ambos os processos apresentaram um deslocamento vertical ainda maior que o apresentado pelas demais vigas, além de uma redução de capacidade de carga drástica em comparação com as vigas apenas corroídas ou apenas fatigadas.

Portanto, sugere-se a continuidade do estudo dos efeitos combinados de fadiga e corrosão em elementos de concreto armado. Alguns parâmetros que foram fixados no presente estudo poderiam ser variados para um melhor entendimento do fenômeno. A mudança do traço do concreto utilizado seria interessante devido ao fato de, atualmente, utilizarem concretos com resistência superior a 25 MPa na execução de OAEs. Outro fator que deveria ser analisado seria a penetração de agentes agressivos em concretos de maior resistência. Uma outra sugestão também seria a variação do número de ciclos de fadiga.

Além disso, o grau de corrosão das armaduras também poderia ser variado, sendo de 5, 10 e/ou 15% de perda de massa. Poderia ser estudada a corrosão dos estribos separadamente, considerando o efeito da corrosão e fadiga em esforços de cisalhamento, levando em consideração que a ruptura das estruturas é frágil nesses casos.

REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 1. ed. ,2000. Não paginado.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. **Valores Críticos de Cloruros para Despassivar Aceros de Refuerzo Embebidos en un Mortero Estandarizado de Cemento Portland**. In: Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 4º, 1997, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, UFRGS, 1997. p. 555-562.
- ACI, American Concrete Institute – **Considerations for design of concrete structures subjected to fatigue loading**. ACI 215R-74. Detroit, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual book of ASTM Standards. **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens**. ASTM G1-03. Philadelphia, 2003.
- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução de Antônio Carmona e Paulo R.L. Helene, São Paulo, PINI, 1992, 104p.
- ANDRADE, C. & GONZALEZ, J. A. **Tendencias Actuales en la Investigación sobre Corrosion de Armaduras**. Revista Informes de la Construcción, Madrid, v. 40, n. 398, p. 7-14, nov.-dic. 1988
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análises das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco**. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- _____. **Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos**. 2001. 256 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- BARONI, H. J. M. **Simulação da Vida Útil de Fadiga do Concreto em Vigas de Tabuleiro de Pontes em Função do Fluxo de Veículos Pesados**. 2010. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- BASTIDAS-ARTEAGA, E.; S´ANCHEZ-SILVA, M.; CHATEAUNEUF, A. e SILVA, M. R. **Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete structures**. Structural safety, v. 30, n. 2, p. 110–129, 2008.
- BASTOS, P. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado**. Notas de Aula de Sistemas Estruturais I. Campus de Bauru/SP–UNESP, São Paulo, 2006.

BELISÁRIO, E. S. **Verificação à Fadiga em Pontes Rodoviárias de Concreto Armado no Brasil: Avaliação de Critério Normativo Simplificado**. 2015. 100 p. Diplomação (Graduação em Engenharia Civil), UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

BRASIL. Tribunal de Contas da União – TCU. **Acórdão nº. 2.864/2010 – Plenário**. Disponível em:

<http://portal3.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/noticias_arquivos/Dnit%20-%20Artes%20Especiais>. Acesso em: nov. 2016.

CAETANO, L. F. **Estudo do Comportamento da Aderência em Elementos de Concreto Armado Submetidos à corrosão e Elevadas Temperaturas**. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

CASCUDO, O. **O controle da Corrosão de Armaduras de Concreto**. Inspeções e técnicas eletroquímicas. 1. ed. São Paulo: PINI; Goiânia: UFG, 1997.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação**. 2004. 242 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), EPUSP/USP, São Paulo, 2004.

CHEN, S.; ZHENG, M; E WAND, B. Study of high-performance concrete subjected to coupled action from sodium sulfate solution and alternating stresses. **Journal of Materials in Civil Engineering. Sci. Ed.**, v. 21, p. 148-153, 2009.

COCA, F. O.; TELLO, M. L.; GAONA-TIBURCIO; C., ROMERO, J. A. e MARTÍNEZ-VILLAFANE, A. Corrosion Fatigue of Road Bridges: a review. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 6, p. 3438-3451, 2011.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON., **Fatigue Design Conceptions**, Plenary Session, Session 4, Fatigue, Treviso, Comité Euro-international du Béton, 1987.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB 238**: new approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion. Bulletin d' Information, Suecis, n. 238, may 1997, 138p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletim Estatístico. Brasília, 2016. Não paginado. Disponível em< <http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: nov.2016.

FERNANDES, R. M., EI DEBS, A.I. H.C. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto**. 2000. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), UFSCAR/USP, São Carlos, 2000.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra a Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas**: Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado. 1994. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. 2007. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GURNEY, T. R. “Fatigue design rules for welded steel joints”. **The Welding Institute Research Building Bulletin**, n. 17, p.115-124. Cambridge, Mai., 1976.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C., ed. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2010. v.1, p. 905-944.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HUSSAIN, S. E.; AL-MUSALLAM, A. e AL-GAHTANI, A. S. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1543–1555, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *General Principles on the Design of Structures for Durability*. **ISO 13823**. Geneva: ISO/TC, 2008.

KROPP, J.; HILSDORF, H. K. **Performance Criteria for Concrete Durability**. Londres: E & FN Spon, 1995. Capítulo 6, p. 138-164.

LORENZI, L. M. *Panteão em Roma - O incrível Panteão de Roma*. Roma, 2016. Disponível em: < <http://www.dicasdaitalia.com.br/2015/09/panteao-em-roma.html#>>. Acesso em: jun. 2016

LUCAS, J. **La pirámide de Djoser**. Espanha: Revista Nacional Geographic Espanã, 2013. Não paginado. Disponível em: < http://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/la-piramide-de-djoser_7518>. Acesso em: jun. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994.

_____. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENEGHETTI, L. C. **Análise do Comportamento à Fadiga de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com PRF de Vidro, Carbono e Aramida**. 2007. 275 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

OYADO, M.; HASEGAWA, M. e SATO, T. **Characteristics of fatigue and evaluation of RC beam damaged by accelerated corrosion**. Quarterly Report of RTRI, v. 44, n. 2, p. 72–77, 2003.

PECELLÍN, M. La Línea del Tiempo de la Historia. Alcalá de Guadaíra, 2016 Disponível em: <<http://mpecellin.blogspot.com.br/>>. Acesso em: jun. 2016.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções**, São Paulo, n. 53, p. 14-19, Jan. 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf> Acesso em: 09 jun. 2010.

ROSSIGALI, C. E. **Atualização do Modelo de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil**. 2013. 278 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, R.E. **A armação do Concreto no Brasil: História da Difusão do Sistema Construtivo Concreto Armado e da Construção de sua Hegemonia**. 2008. 338 p. Tese (Doutorado em Educação) - Programa de Pós-Graduação em Educação, UFMG, Belo Horizonte, 2008.

SHI, Z. e ZHANG, L. Simulation of interfacial fatigue of reinforced concrete under different loading cases. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 12, n. 4, p. 561, 2004.

TULA, L. S. Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável. São Paulo, 2000. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

YI, W.-J.; KUNNATH, S.K.; SUN, X.-D.; Shi C.-J.e TANG, F.-J. **Fatigue behavior of reinforced concrete beams with corroded steel reinforcement**. ACI Structural Journal, v. 107, n. 5, p. 526, 2010.