

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

Leonardo Sena Cabrera

**VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À
CORROSÃO ACELERADA: AVALIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE
REPARO COM DIFERENTES MATERIAIS POZOLÂNICOS**

Porto Alegre
dezembro 2014

LEONARDO SENA CABRERA

**VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À
CORROSÃO ACELERADA: AVALIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE
REPARO COM DIFERENTES MATERIAIS POZOLÂNICOS**

Trabalho de Diplomação 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 2014

LEONARDO SENA CABRERA

**VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À
CORROSÃO ACELERADA: AVALIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE
REPARO COM DIFERENTES MATERIAIS POZOLÂNICOS**

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 Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de dezembro de 2014

Profa. Ângela Gaio Graeff
PhD pela Universidade de Sheffield
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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

Dedico este trabalho a meus pais, Sidnei Cabrera e Marilene Sena e ao meu amor Graziella Domingues, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Sidnei e Marilene, a minha linda Graziella, aos meus amigos e familiares, por sempre terem acreditado em mim, por sempre terem me dado todo o apoio e principalmente por terem me encorajado a continuar mesmo nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço a Profa. Ângela Gaio Graeff, orientadora deste trabalho, pelo interesse e dedicação demonstrados durante todo o período de orientação.

Agradeço a ArcelorMittal, em especial a Margarete Cerutti Lizardo, pela doação do aço utilizado na pesquisa.

Agradeço ao Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais e aos seus bolsistas pelo grande apoio nas etapas de experimentais da pesquisa, em especial ao Vinicius Silveira Marques, a Rafaela de Andrade, ao Michael Parisotto e Victor Ivan Dal Bosco.

Agradeço aos técnicos do LEME senhor Edgar e especialmente ao senhor Fontes, pela sua grande contribuição para o sucesso desta pesquisa, especialmente nas etapas finais.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt por todo o empenho demonstrado, nas correções dos trabalhos, e pelas dicas durante esses dois semestres de convívio.

Agradeço ao professor João Luiz Campagnolo por todo o conhecimento passado na disciplina de patologia e instrumentação das construções, que foi essencial para a realização deste trabalho.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

Leonardo da Vinci

RESUMO

Os crescentes problemas relacionados ao aparecimento precoce de manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado, ocasionando a redução da vida útil dos elementos, têm sido alvo de inúmeros estudos que visam encontrar as causas e as formas de controlar esses problemas. Neste sentido, este trabalho aborda algumas formas de recuperação de estruturas submetidas à corrosão de armaduras, com ênfase para a eficiência no desempenho mecânico entre diferentes argamassas de reparo. Para tanto, elementos estruturais de concreto armado, do tipo viga, foram moldados e submetidos à corrosão de suas armaduras. Podem ser utilizadas diferentes técnicas para acelerar o processo corrosivo, tendo sido escolhida a técnica chamada de CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada), que utiliza uma solução de cloretos aliada à aplicação de uma diferença de potencial, induzindo assim a corrosão nas barras de aço. Os elementos de concreto danificados pela corrosão acelerada de armaduras foram recuperados utilizando-se diferentes argamassas de reparo, com diferentes materiais pozolânicos (sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz) em substituição parcial ao cimento. No total foram moldadas cinco vigas, sendo uma referência, a qual não foi submetida à corrosão, uma referência submetida à corrosão, e outras três vigas submetidas à corrosão e restauradas com as diferentes argamassas de reparo. Para que o desempenho do elemento restaurado seja satisfatório, deve-se garantir a aderência entre a argamassa de reparo utilizada no fechamento do mesmo com o substrato de concreto envelhecido. Este comportamento foi observado através de ensaios de flexão, em que se verificou o aparecimento de fissuras por meio de uma inspeção visual – no concreto, na argamassa e no principalmente no contato entre a argamassa e o substrato – a cada incremento de carga. Além disso, utilizaram-se deflectômetros para acompanhar os deslocamentos no contato entre os materiais. Os resultados obtidos foram comparados aos obtidos para a viga testemunho. Os resultados mostram que a argamassa de reparo com sílica ativa mostrou o melhor desempenho mecânico em comparação com as argamassas de metacaulim e cinza de casca de arroz.

Palavras-chave: Manifestações Patológicas em Concreto. Corrosão de Armaduras. Aderência entre Argamassa e Substrato de Concreto. Recuperação de estruturas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho	18
Figura 2 – Evolução conceitual do projeto das estruturas de concreto	23
Figura 3 – Célula de corrosão em concreto armado	27
Figura 4 – Variação da profundidade de carbonatação com o tempo	30
Figura 5 – Detalhamento da armadura	46
Figura 6 – Isolamento dos cantos dos estribos	47
Figura 7 – Estribos isolados em contato com a armadura longitudinal positiva	47
Figura 8 – Posicionamento dos estribos	48
Figura 9 – Fixação dos estribos na armadura positiva	49
Figura 10 – Armadura montada	49
Figura 11 – Fio de cobre sobre as barras positivas	50
Figura 12 – Posicionamento das armaduras nas fôrmas	50
Figura 13 – Espaçadores de argamassa	51
Figura 14 – Pesagem dos materiais	52
Figura 15 – Materiais para produção do concreto	53
Figura 16 – Adensamento do concreto	53
Figura 17 – Concretagem finalizada	54
Figura 18 – Retificação dos corpos de prova	55
Figura 19 – Corpo de prova antes e após ruptura por compressão	55
Figura 20 – Compressômetro	57
Figura 21 – Ensaio de módulo	57
Figura 22 – Corrente e diferenças de potencial ajustadas na fonte	58
Figura 23 – Ligações do método CAIM	59
Figura 24 – 1ª semana do método CAIM	59
Figura 25 – 2ª semana do método CAIM	60
Figura 26 – 3ª semana do método CAIM	60
Figura 27 – 4ª semana do método CAIM	60
Figura 28 – Produtos de corrosão após conclusão do CAIM	61
Figura 29 – Fissura causada pela corrosão	61
Figura 30 – Remoção do concreto deteriorado	62
Figura 31 – Armadura corroída em processo de escovação	63
Figura 32 – Armadura corroída antes e após escovação.....	63
Figura 33 – Pintura da armadura corroída com Nitroprimer ZN	64

Figura 34 – Materiais para argamassa de sílica ativa	65
Figura 35 – Materiais para argamassa de metacaulim	66
Figura 36 – Materiais para argamassa de cinza de casca de arroz	66
Figura 37 – Argamassa de reparo pronta para a aplicação	67
Figura 38 – Lançamento da argamassa na viga de concreto	68
Figura 39 – Lançamento da argamassa na viga de concreto com auxílio de fôrmas	68
Figura 40 – Grampo tipo sargento	69
Figura 41 – Viga com a superfície argamassada nivelada	69
Figura 42 – Viga em processo de cura em câmara úmida	70
Figura 43 – Deflectômetro para medidas de deslocamento vertical da viga	71
Figura 44 – Deflectômetro para medidas de deslocamento lateral	72
Figura 45 – Marcação de apoio	73
Figura 46 – Esquadro para marcação de apoio	73
Figura 47 – Regularização da superfície da viga	74
Figura 48 – Esquema de carregamento das vigas	74
Figura 49 – Célula de carga	75
Figura 50 – Medidor de carga	75
Figura 51 – Flecha da viga após ruptura	76
Figura 52 – Fissuras provocadas pela flexão	76
Figura 53 – Evolução da resistência à compressão do concreto	78
Figura 54 – Gráfico tensão x deformação do concreto	78
Figura 55 – Gráfico carga x deslocamento vertical	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação para o cimento CP-V Nacional	43
Tabela 2 – Composição granulométrica da areia utilizada na pesquisa	44
Tabela 3 – Composição granulométrica da brita utilizada na pesquisa.....	44
Tabela 4 – Propriedades químicas dos materiais pozolânicos utilizados para as argamassas de reparo	45
Tabela 5 – Propriedades físicas dos materiais pozolânicos utilizados para as argamassas de reparo.....	45
Tabela 6 – Cálculo do volume de concreto	51
Tabela 7 – Traço do concreto	52
Tabela 8 – Cálculo do volume de argamassa	64
Tabela 9 – Dosagem das argamassas	65
Tabela 10 – Resistência à compressão do concreto	77
Tabela 11 – Módulo de elasticidade do concreto	79
Tabela 12 – Resistência à compressão da argamassa com sílica ativa	79
Tabela 13 – Resistência à compressão da argamassa com metacaulim	80
Tabela 14 – Resistência à compressão da argamassa com cinza de casca de arroz	80
Tabela 15 – Carga de ruptura e flecha máxima das vigas após ensaio de flexão	82
Tabela 16 – Eficiência na fase de fissuração das vigas recuperadas	82
Tabela 17 – Eficiência no regime plástico das vigas recuperadas.....	83
Tabela 18 – Deslocamentos laterais entre o concreto e as argamassas	83

LISTA DE SIGLAS

CV – Ciclo de Vida

CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada

CCV – Custo do Ciclo de Vida

DES – Desempenho

D – Durabilidade

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

R – Resistência

SUS – Sustentabilidade

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UR – Umidade Relativa

VU – Vida Útil

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_b = tensão (MPa)

ε_b = deformação específica média sob tensão de compressão

ε_α = deformação específica média sob tensão de compressão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DE PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.2 Objetivos secundários	16
2.3 HIPÓTESE	17
2.4 PRESSUPOSTO	17
2.5 PREMISSE	17
2.6 DELIMITAÇÕES	17
2.7 LIMITAÇÕES	17
2.8 DELINEAMENTO	18
3 CONCRETO ARMADO: CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURABILIDADE DE ELEMENTOS SUBMETIDOS À CORROSÃO DE ARMADURAS	21
3.1 CONCEITOS BÁSICOS	21
3.1.1 Desempenho, Vida Útil e Durabilidade	22
3.1.2 Patologia das Estruturas	24
3.1.3 Manutenção	25
3.2 CORROSÃO DE ARMADURAS	26
3.2.1 Fatores que Desencadeiam a Corrosão de Armaduras	26
3.2.2 Carbonatação do Concreto	28
3.2.3 Corrosão Induzida por Cloretos	30
3.3 ACELERAÇÃO DA CORROSÃO	31
3.4 RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS.....	33
3.5 MATERIAIS POZOLÂNICOS PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARO	37
3.5.1 Sílica ativa	38
3.5.2 Metacaulim	40
3.5.3 Cinza de casca de arroz	41
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
4.1 PLANO EXPERIMENTAL	42
4.2 MATERIAIS	43
4.2.1 Cimento	43

4.2.2 Areia	43
4.2.3 Brita	44
4.2.4 Materiais pozolânicos	45
4.3 MONTAGEM DAS ARMADURAS	45
4.4 CONCRETAGEM	51
4.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	54
4.6 ACELERAÇÃO DA CORROSÃO	57
4.7 RECUPERAÇÃO DAS VIGAS	62
4.8 INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS	70
4.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	72
5 RESULTADOS	77
5.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	77
5.2 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	78
5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS	79
5.4 ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS	80
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
6.1 CONCLUSÕES	84
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

A corrosão de armaduras é um grave e frequente problema para as estruturas de concreto armado das edificações e em geral são ocasionadas por erros de projeto, por falhas na execução, ou mesmo pelo uso de substâncias nocivas às armaduras das estruturas, como por exemplo, cloretos empregados na fabricação de alguns aditivos. Também pode ser causada pela falta de manutenção e exposição a ambientes agressivos. A corrosão das armaduras provoca a fissuração no concreto devido ao aumento de volume do aço, já que este, estando em processo corrosivo, aumenta seu volume de forma muito significativa. Além disso, as armaduras corroídas liberam óxidos que provocam manchamentos nas estruturas.

No início de sua utilização, o concreto armado era visto como sinônimo de elevada eficiência quanto aos requisitos de resistência mecânica e que demandava pouco ou praticamente nenhum reparo. Porém com o passar dos anos apareceram em muitas edificações problemas de deterioração precoce na sua estrutura, sendo alguns destes de grande importância estrutural, como por exemplo, a corrosão de armaduras. A partir daí cresceu a necessidade da realização de estudos, com o objetivo de buscar respostas para os problemas de deterioração apresentados.

A partir destes estudos surgem os conceitos – como na medicina – de patologia, sintomatologia, manifestações patológicas e terapia, originando assim, a área de patologia das construções. A patologia das construções tem como finalidade realizar o diagnóstico das patologias, buscando encontrar as causas, a origem e as possíveis soluções para os problemas.

A durabilidade das estruturas de concreto armado depende de alguns importantes fatores, entre eles, a relação água-aglomerante da mistura, a região onde a edificação será construída, os cobrimentos adotados para as armaduras, as características dos materiais do concreto – agregados, adições e aditivos utilizados. Dentre estes, o fator de maior importância para a durabilidade do concreto é a relação água-aglomerante, visto que esta controla características como densidade, compacidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e a fissuração por retração, além da resistência mecânica.

Outro fator importante para a durabilidade da edificação é a classe da agressividade ambiental da região em que a mesma será construída. Esse fator deve ser levado em conta no projeto estrutural da edificação, já que para ambientes de alta agressividade ambiental, como por exemplo, ambientes marinhos, devem ser especificados concretos mais resistentes, ou seja, com baixa relação água-aglomerante, e maiores cobrimentos de armaduras.

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo avaliar, em laboratório, elementos de concreto armado, especificamente vigas, com armaduras submetidas a 10% de perda de massa devido à corrosão e propor soluções e técnicas para estancar este grave problema e recuperar a estrutura.

O trabalho aqui apresentado desenvolve-se a partir desta introdução. No capítulo 2 são apresentadas as diretrizes que regem esta pesquisa, sendo estas: questão de pesquisa, objetivos de pesquisa, hipótese, pressuposto, premissa, delimitações, limitações, delineamento.

No capítulo 3 são apresentados através de revisão bibliográfica os principais aspectos ligados às manifestações patológicas frequentemente encontradas em estruturas de concreto armado. Este estudo contempla desde a apresentação de alguns conceitos básicos, como por exemplo, durabilidade, desempenho e vida útil, até as formas e materiais utilizados na recuperação das estruturas. São apresentadas neste capítulo também as principais formas de ocorrência da corrosão nas barras de aço do concreto armado, sendo elas por carbonatação ou por ataque de cloretos, além da técnica utilizada para promover a aceleração do processo corrosivo, além das formas de recuperação de estruturas e os materiais pozolânicos a serem utilizados no programa experimental do presente trabalho.

A partir do capítulo 4 é apresentado o programa experimental desenvolvido em laboratório. São mostradas neste capítulo todas as fases da pesquisa, iniciando pela montagem das armaduras para as vigas, passando pela concretagem e cura. Ainda neste capítulo são descritos os métodos utilizados para acelerar a corrosão nas armaduras das vigas e a forma de reparo empregado no experimento.

Nos capítulos 5 e 6 são evencados os resultados obtidos dos experimentos e as conclusões obtidas, baseando-se nestes resultados.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

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

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a argamassa de reparo, que utilizada na restauração dos elementos de concreto armado estudados, apresenta maior eficiência em termos de desempenho mecânico, obtida através do ensaio de resistência à flexão?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

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

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é estabelecer uma comparação entre o desempenho mecânico, através de ensaio de flexão, de diferentes argamassas de reparo utilizadas para a recuperação de elementos de concreto armado previamente submetidos a um processo de corrosão acelerada (da ordem de 10% de perda de massa das barras de armadura).

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) descrição das técnicas e métodos utilizados experimentalmente para o processo acelerado de corrosão e restauração das armaduras;
- b) elaboração de um método de instrumentação adequado para avaliar a aderência entre argamassas de reparo e o substrato.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a argamassa que apresenta melhor eficiência em termos de desempenho mecânico é a argamassa composta por cimento, areia, sílica ativa e água – numa proporção água/aglomerante de 0,50.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem como pressupostos que:

- a) os elementos de concreto armado, submetidos ao ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – apresentam as mesmas características de perda de massa das barras de armaduras e deterioração do concreto após o ensaio;
- b) o modelo proposto por Graeff (2007), para determinar o tempo de ensaio necessário para atingir 10% da perda de massa das barras de armadura, através do CAIM, é válido.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que as estruturas de concreto armado das edificações, frequentemente, apresentam corrosão das barras de armaduras e necessitam ser restauradas adequadamente para se obter o desempenho previsto em projeto.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a ensaios de flexão para avaliar a eficiência no comportamento mecânico de argamassas de reparo utilizadas em vigas de concreto armado submetidas ao processo de aceleração da corrosão.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o concreto e as argamassas de restauro dos elementos ensaiados foram produzidos, moldados e curados em laboratório;

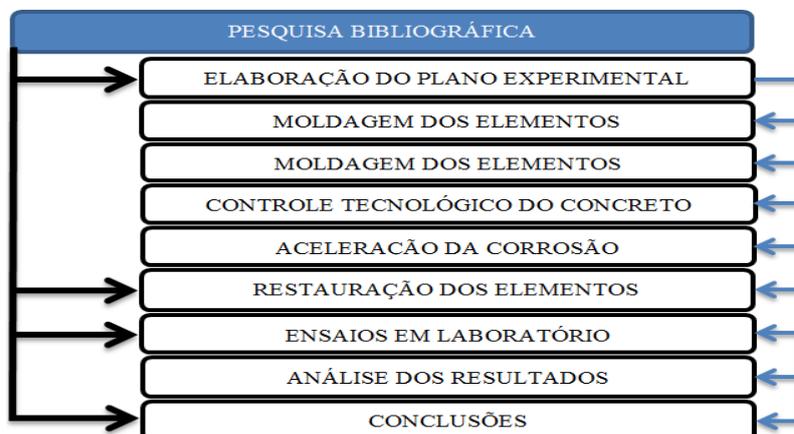
- b) o concreto empregado nos elementos possui resistência média (f_{cj}) de 30MPa aos 28 dias;
- c) as vigas de concreto armado possuem dimensões de 7x14x130 cm;
- d) a corrosão das armaduras dos elementos ensaiados foi produzida em laboratório, através do ensaio CAIM;
- e) as argamassas empregadas no reparo das vigas foram compostas por,
 - cimento, areia, água e adição sílica ativa;
 - cimento, areia, água e adição de metacaulim;
 - cimento, areia, água e adição de cinza de casca de arroz;
- f) o ensaio realizado foi o de resistência à flexão.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) moldagem dos elementos de concreto armado;
- d) controle tecnológico do concreto;
- e) aceleração da corrosão;
- f) restauração dos elementos;
- g) ensaios em laboratório;
- h) análise dos resultados;
- i) conclusões.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Com intuito de entender melhor sobre o tema proposto, se realizou inicialmente a pesquisa bibliográfica. Nesta etapa foram feitas pesquisas em variadas obras, a fim de encontrar e entender os métodos e as técnicas a serem empregadas nas atividades experimentais. O passo seguinte foi elaborar o plano experimental que teve por objetivo definir a forma de realização dos ensaios. Ainda nesta etapa foram definidas: a quantidade de elementos de concreto armado a serem moldados, as dimensões dos mesmos e as armaduras a serem utilizadas nas vigas.

A definição do plano experimental possibilitou a realização dos ensaios. O primeiro passo consistiu em modelar os elementos estruturais estudados, iniciando pela armação e montagem das armaduras, passando posteriormente por concretagem e adensamento. Nesta etapa também foram moldados, corpos de prova cilíndricos para medir a resistência à compressão do concreto utilizado, de acordo com a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007). Foram moldados então doze corpos de provas com dimensões de 10x20 cm, sendo utilizados três corpos de prova para medir a resistência do concreto em diferentes idades – aos 7, 14 e 28 dias – e três corpos de prova para medir o módulo de elasticidade aos 28 dias. Com os elementos moldados se iniciou a etapa de cura do concreto. Esta atividade ocorreu em câmara úmida com uma duração de 28 dias.

Na etapa de aceleração da corrosão, os elementos foram parcialmente imersos em uma solução de NaCl de 35g/l. Um fio de cobre rígido colocado sobre as barras de armadura longitudinais positivas, na etapa de moldagem dos elementos, foi ligado ao polo positivo da fonte e um outro fio colocado na solução de NaCl foi ligado ao polo negativo da fonte, induzindo assim, uma diferença de potencial na configuração, que por sua vez, gerou uma corrente elétrica. Este método – chamado método CAIM – provocou a aceleração da corrosão das armaduras.

Quando a aceleração da corrosão completou 30 dias a fonte foi desligada, encerrando a etapa de aceleração da corrosão, e iniciando a etapa de restauração dos elementos estruturais. Nesta fase, o concreto danificado foi removido até obter-se apenas concreto sem sinais de deterioração. A etapa seguinte consistiu em recuperar as barras das armaduras, através de limpeza e aplicação de produtos para deter a corrosão. Após a secagem do produto aplicado sobre a armadura aplicou-se então as argamassas de reparo, promovendo o fechamento do elemento. As argamassas de reparo utilizadas foram curadas, para evitar fissuração das

mesmas e o ingresso de substâncias nocivas às barras de armadura restauradas. A partir daí, realizam-se os ensaios para determinação da eficiência em termos de desempenho mecânico das diferentes argamassas de reparo. Com os ensaios realizados, pode-se então, analisar os resultados obtidos e concluir a pesquisa.

3 CONCRETO ARMADO: CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURABILIDADE DE ELEMENTOS SUBMETIDOS À CORROSÃO DE ARMADURAS

O concreto é um dos materiais mais importantes na construção civil pelo fato de normalmente apresentar um bom comportamento mecânico e boa durabilidade. Porém, este material de elevada resistência à compressão não possui esta mesma característica se submetido a esforços de tração. Para que seu desempenho seja satisfatório utiliza-se no interior do concreto barras de aço, que tem a função de suportar os esforços de tração, flexão e torção do elemento estrutural.

O concreto armado, porém, se deteriora com o passar do tempo, reduzindo seu desempenho e, portanto, deixando de atender às necessidades do fim para o qual foi projetado. Aliado a isso, tem-se também os erros de projeto, má execução e falta de manutenção que contribuem para a degradação prematura da estrutura.

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos relacionados com o tema proposto para o trabalho.

3.1 CONCEITOS BÁSICOS

O rápido crescimento da construção civil acarretou a necessidade de buscar novas formas de construir. Juntamente ao crescimento da construção civil, ocorreu o avanço tecnológico. Tais tecnologias influenciam não somente a construção em si, mas também a forma de projetar. O uso de novos *softwares* para o cálculo das estruturas, por exemplo, e aceitação, ainda que dentro de certos limites, de maiores riscos, possibilitaram a redução das dimensões dos elementos estruturais, e a redução do custo da obra.

Em contrapartida, este avanço tecnológico acarretou em obras menos duráveis, apresentando precocemente deterioração dos materiais e uma série de problemas que não se verificavam antes do emprego destas tecnologias. Muitos desses problemas ocorreram pela falta de

experiência dos responsáveis pela execução da obra em relação ao novo modelo de edificação, com elementos estruturais mais esbeltos.

A partir daí, surgiram inúmeros estudos que buscavam encontrar as causas para os problemas precoces apresentados nas edificações. Constatou-se, então, que este modelo estrutural necessita de muitos cuidados, desde a fase de projetos até o final da execução, passando ainda por um rígido controle sobre a execução. As novas estruturas e o próprio concreto passaram a exigir um tratamento diferenciado quando comparado ao que era dispensado a eles.

Baseado nestes estudos surge então, a necessidade de se construir edificações mais duráveis, isto é, com vida útil mais elevada, e que atendam satisfatoriamente as condições mínimas de habitabilidade necessárias para utilização humana, dando origem assim, aos conceitos de:

- a) desempenho, vida útil e durabilidade;
- b) patologia das estruturas;
- c) manutenção.

3.1.1 Desempenho, vida útil e durabilidade

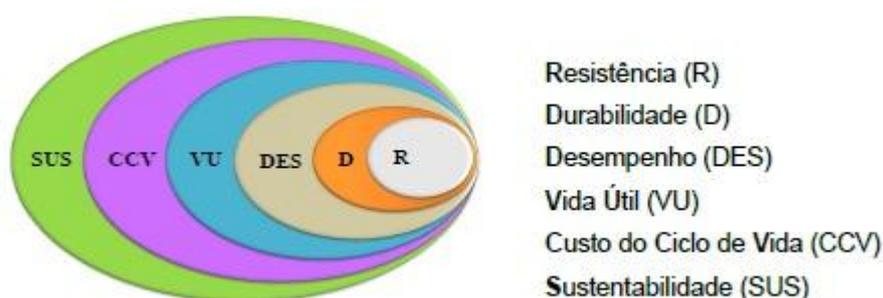
Os conceitos de desempenho, vida útil e durabilidade estão intimamente associados. A durabilidade pode ser entendida como a capacidade dos materiais, empregados em uma determinada construção, de resistir aos efeitos da agressividade ambiental. Os materiais tendem a se deteriorar quando expostos a agressividade do meio ambiente, e quando os efeitos da deterioração atingem os limites máximos especificados em projeto, diz-se que a vida útil do material chegou ao final, podendo colocar em risco a vida dos usuários da edificação. Neste caso, a edificação não possui mais o desempenho adequado e necessita de reparos e/ou reforços para que seu desempenho seja reestabelecido.

Possan (2010, p. 61-62) destaca que:

No início do desenvolvimento e difusão do concreto armado (ver Figura [...] [2]), as estruturas eram projetadas utilizando bom senso e experiência profissional, onde a principal característica controlada era a resistência à compressão (R), que durante muito tempo foi tida como fonte única e segura das especificações de projeto. Com o passar dos anos, ocorreram grandes mudanças nos materiais de construção, ambiente de exposição e procedimentos de cálculos. Verificou-se que o concreto armado apresentava limitações e que somente o parâmetro resistência (R) era insuficiente para atender às exigências de projeto. Então se enfatizou a durabilidade (D) destas estruturas e dos seus materiais constituintes, aliando posteriormente este conceito ao desempenho (DES) das mesmas, ou seja, ao comportamento em uso. Contudo, ainda

faltava inserir nos projetos a variável **tempo**, surgindo então os estudos de vida útil (VU). Atualmente, fatores como competitividade, custos e preservação do meio ambiente estão novamente impondo mudanças na maneira de se conceber estruturas, exigindo que estas sejam projetadas de forma holística, pensando no seu ciclo de vida (CV) e nos custos associados (CCV - Custo do Ciclo de Vida). A partir do CCV vários estudos podem ser conduzidos, com destaque às estimativas de custos de manutenção ao longo da vida útil, estudos de impacto ambiental, entre outros, auxiliando na seleção da melhor alternativa de projeto para novas estruturas ou de manutenção, reparo, reabilitação ou destinação final para estruturas existentes. Com isso o projeto para a sustentabilidade (SUS) torna-se possível.

Figura 2 – Evolução conceitual do projeto das estruturas de concreto



(fonte: POSSAN, 2010)

O desempenho de uma edificação depende das exigências do usuário, portanto, pode variar de um indivíduo para outro. As condições de exposição do ambiente também afetam o desempenho da edificação, podendo o desempenho da mesma ser extremamente adequado para um indivíduo em um determinado tipo de clima, e extremamente desagradável para o mesmo indivíduo em outro local com clima diferente, por exemplo.

A durabilidade de uma edificação de concreto armado, em especial a estrutura da edificação, depende fundamentalmente de alguns fatores. Entre eles, destacam-se a água empregada no concreto e agressividade ambiental do local de execução da obra. A relação água/aglomerante afeta diretamente a durabilidade das estruturas, pois desta relação dependem:

- a) a resistência mecânica do concreto;
- b) porosidade;
- c) densidade;
- d) permeabilidade;
- e) fissuração por retração;

f) capilaridade.

Um concreto com alta relação água/cimento é um concreto menos resistente em relação a outro com menor relação água/cimento. Além disso, a grande quantidade de água empregada na fabricação do concreto gera elevada quantidade de poros, visto que, toda água desnecessária à hidratação do cimento sai e o espaço ocupado pela água fica vazio. A saída da água causa também, fissuras por retração e poros capilares.

A agressividade do meio ambiente também é um importante fator para a durabilidade das estruturas, já que em alguns tipos de ambientes há grande incidência de agentes químicos que por sua vez, atacam as estruturas. Destacam-se os ambientes marinhos e industriais. Em um ambiente marinho há grande quantidade de cloretos, e estes percolam pelos poros do concreto provocando a corrosão das armaduras dos elementos estruturais. Já em ambientes industriais há elevada quantidade de produtos químicos, que assim como os cloretos, penetram no concreto despassivando as armaduras e provocando a corrosão. Ambientes urbanos também podem provocar a corrosão de armaduras devido à carbonatação do concreto.

3.1.2 Patologia das estruturas

A prematura redução do desempenho das edificações, devido principalmente a precoce degradação da mesma, é um frequente problema no mundo todo. Esta degradação precoce ocorre principalmente devido a baixa qualidade dos materiais empregados, aliada a erros de projeto e execução e a falta de manutenção.

Os problemas que atingem as edificações, em especial as estruturas, são chamados de manifestações patológicas, e estas podem provocar nas estruturas a perda de desempenho. A gravidade das manifestações patológicas varia de acordo com as causas e origens do problema, sendo menos graves, por exemplo, as fissuras passivas ou mortas. Entre as manifestações patológicas de natureza grave, destaca-se a corrosão das barras de armadura. Além das fissuras, outros sintomas permitem constatar a presença de manifestação patológica na estrutura, por exemplo: flechas excessivas, manchamento no concreto aparente e ninhos de concretagem.

A patologia das estruturas é o ramo da Engenharia que busca encontrar então:

- a) os sintomas;
- b) as causas;
- c) as origens;
- d) as consequências;
- e) e os mecanismos de ocorrência das falhas.

A sintomatologia tem como objetivo investigar as edificações, a fim de encontrar indícios da existência de manifestações patológicas. Havendo a identificação de problemas, é necessário então, entender o funcionamento do mecanismo de deterioração, promovendo assim o diagnóstico da estrutura. Nesta etapa, são investigadas as causas e as origens do problema, para que se possa estabelecer com precisão a gravidade do problema. Cada causa de manifestação patológica necessita de tratamento específico. Por exemplo, fissuras térmicas devem receber tratamento diferenciado das fissuras causadas pela flexão do elemento. Isto ocorre pelo fato de que, as movimentações térmicas sempre existem e conseqüentemente necessitam utilizar materiais flexíveis para o reparo das fissuras. Já fissuras de flexão, devido à sobrecarga, por exemplo, são fissuras passivas e assim, estáveis após a retirada do excesso de carga, podendo ser reparadas com materiais rígidos (HELENE, 1993, p. 159).

A fase seguinte da avaliação das manifestações patológicas das estruturas é o prognóstico. Neste estágio determina-se a forma de evolução do problema e, portanto, suas consequências. Durante a fase de prognóstico são tomadas as decisões quanto aos materiais e as técnicas a serem utilizadas no reparo da estrutura, nos casos em que este é viável economicamente. Definidos os materiais e as técnicas, encaminha-se então, para a fase de terapia, na qual a restauração do elemento é executada. Nos casos em que a terapia não é economicamente viável, opta-se pela demolição da estrutura (HELENE, 1993, p. 161).

3.1.3 Manutenção

Souza e Ripper (1998, p. 21) entendem por manutenção de estruturas “[...] o conjunto de atividades necessárias à garantia do seu desempenho satisfatório ao longo do tempo, ou seja, o conjunto de rotinas que tenham por finalidade o prolongamento da vida útil da obra, a um custo compensador.”.

A manutenção das estruturas de concreto armado deve ser considerada desde a etapa de projeto devido a sua grande importância. Deve ser realizado um cronograma de visitas periódicas a edificação a fim de examinar as estruturas, buscando encontrar vestígios de manifestações patológicas. Caso algum problema seja encontrado, que pode não ser necessariamente grave, deve-se proceder à manutenção da estrutura, através de metodologias previamente definidas na etapa de projetos.

3.2 CORROSÃO DE ARMADURAS

De modo geral, Gentil (1996, p. 1) define “[...] corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por à ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos [...]”. Ainda segundo o autor, “[...] pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, [ou seja, o metal retorna ao estado original] [...]”. Segundo Helene (1986, p. 2), os processos pelos quais as armaduras sofrem corrosão são de dois tipos fundamentalmente, a oxidação e a corrosão propriamente.

Segundo Gentil (1996, p. 8-9), a corrosão de natureza química, conhecida também como oxidação, decorre da reação dos átomos do ferro com o oxigênio da atmosfera (reação gás-metal), formando uma película contínua e uniforme de produtos de corrosão (óxidos de ferro) na superfície da armadura.

Helene (1986, p. 2) entende por corrosão propriamente dita:

[...] o ataque de natureza preponderantemente eletroquímica, que ocorre em meio aquoso. A corrosão ocorre quando é formada uma película de eletrólito sobre a superfície dos fios ou barras de aço. Esta película é causada pela presença de umidade no concreto, salvo situações especiais e muito raras, tais como dentro de estufas ou sob ação de elevadas temperaturas ($> 80^{\circ}\text{C}$) e em baixas umidade relativa ($\text{UR} < 50\%$). Este tipo de corrosão é também responsável pelo ataque que sofrem as armaduras antes de seu emprego, quando ainda armazenadas no canteiro. É o tipo de corrosão que o engenheiro civil deve conhecer e com a qual deve se preocupar. É melhor e mais simples preveni-la do que tentar saná-la depois de iniciado o processo.

3.2.1 Fatores que desencadeiam a corrosão de armaduras

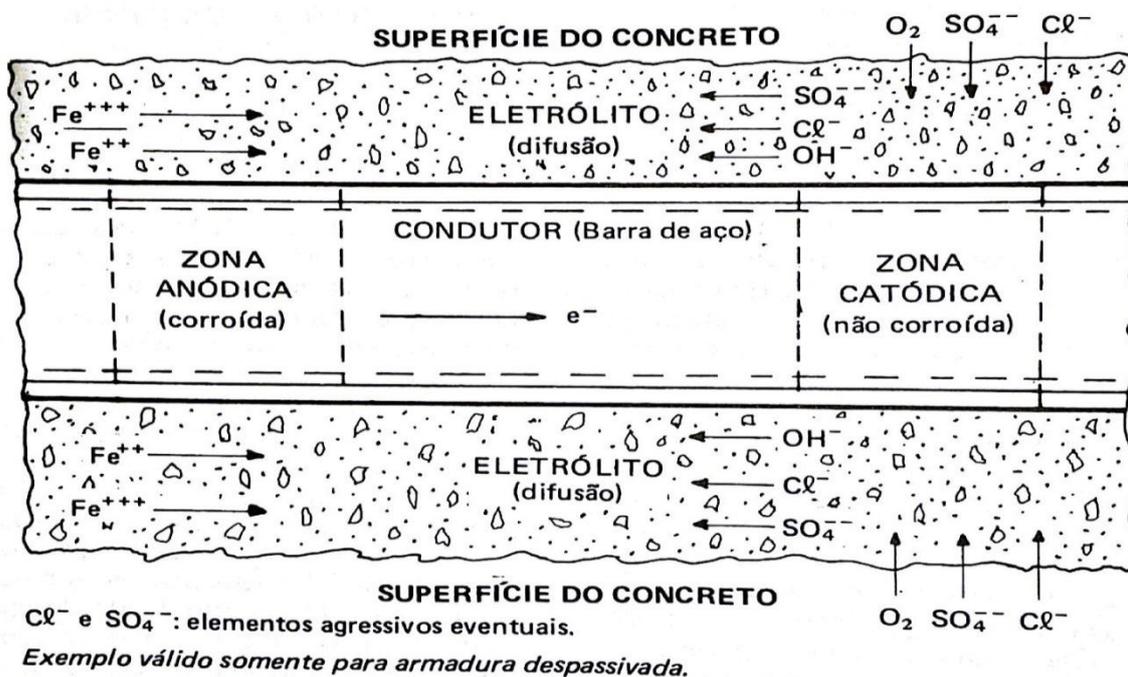
Segundo Helene (1986, p. 2), a corrosão das barras de armadura no interior do concreto ocorre de forma eletroquímica, necessitando assim, da existência de água ou ambiente com umidade relativa superior a 60%.

De acordo com Rusch¹ (1975 apud HELENE, 1986, p. 2), a corrosão eletroquímica tende a produzir óxidos de ferro e este tipo de corrosão necessita de circunstâncias especiais para ocorrer:

- existência de um eletrólito;
- existência de diferença de potencial;
- existência de oxigênio.
- existência ou não de agentes agressivos.

Nas etapas de projetos deve-se pensar em soluções para evitar a corrosão das barras de aço, pois no concreto sempre há os requisitos mínimos para o início da corrosão. Conforme Helene (1986, p. 2), sempre se tem a possibilidade de formação de eletrólito (figura 3), pois sempre há presença de água no concreto, além do hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que também forma um eletrólito quando dissolvido na água.

Figura 3 – Célula de corrosão em concreto armado



(fonte: PORRERO², 1975 apud HELENE, 1986)

¹ RUSCH, H. **Hormigón armado y hormigón pretensado: propiedades de los materiales y procedimientos de calculo.** Barcelona: Compañia Editorial Continental, 1975.

De acordo com Verbeck³ (1975 apud HELENE, 1986, p. 3):

Qualquer diferença de potencial que se produza entre dois pontos da barra, por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço, é capaz de desencadear pilhas ou cadeias de pilhas conectadas em série. Na maioria das vezes, formam-se micropilhas que podem até mesmo alternar de posição os polos, ocasionando a **corrosão generalizada**.

O oxigênio pode penetrar pelos poros do concreto e atingir as barras de aço. No momento em que isto ocorre e havendo diferença de potencial e eletrólito no concreto, iniciam-se as reações químicas provocando a corrosão das armaduras.

De acordo com Helene (1986, p. 3) algumas substâncias podem fazer com que a corrosão de armaduras ocorra de forma precipitada. Essas substâncias ao entrarem em contato com o concreto provocam a ruptura da camada passiva que protege as barras de armaduras, facilitando a corrosão das barras de aço. Entre elas destacam-se:

- a) os cloretos (Cl^-);
- b) os sulfetos (S^{2-});
- c) o dióxido de carbono (CO_2);
- d) os nitritos (NO_2^-).

3.2.2 Carbonatação do concreto

De acordo com Helene (1993, p. 92), “A armadura dentro do concreto está protegida contra a corrosão por uma barreira física e preponderantemente devido ao fenômeno da passivação conferida pela alta alcalinidade da solução intersticial do concreto.”.

Quando ocorre a mistura entre o cimento e água, há formação de uma pasta. Entre os sólidos que se formam nesta pasta estão os cristais de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que é formado a partir das reações de hidratação do cimento. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 25), os cristais de hidróxido de cálcio “[...] constituem 20 a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada [...]”. O ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) livre no interior do concreto confere as barras de aço um filme altamente alcalino, protegendo desta forma as barras de armaduras.

² PORRERO, J. I. **Causas que en la practica producen la corrosión de las armaduras de concreto**. Caracas, 1975. *Boletín del IMME*, v.12, n. 49, p. 25-49.

³ VERBECK, G. J. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In: *CORROSION of metals in concrete*, v. 49, n. 3, 1975, Detroit. ACI-Special Publication... Detroit: American Concrete Institute, 1975. p. 21-38.

A corrosão induzida por carbonatação do concreto atua de forma lenta e não tão intensa, como a corrosão provocada pela ação de cloretos. Todavia, esta representa uma deterioração de alto risco para as estruturas, pois promove a despassivação da camada protetora das barras de armaduras, impulsionando assim, o início de uma corrosão generalizada.

A corrosão generalizada, segundo Andrade (1992, p. 29-30):

Ocorre por uma redução da alcalinidade do concreto que pode ser devido a uma **lixiviação** por circulação de águas puras ou ligeiramente ácidas ou por reação dos compostos de caráter básico NaOH, K OH e Ca (OH)₂ da fase aquosa do concreto com os componentes ácidos da atmosfera dióxido de carbono (CO₂) e de enxofre (SO₂) para dar carbonatos-sulfatos e água. O que mais abunda é o CO₂, processo de redução de alcalinidade chamado genericamente **carbonatação**. Uma característica deste processo é a existência de uma **frente** de avanço do processo que separa as duas zonas com pH muito diferentes, uma com pH > 13 e outra com pH <8.

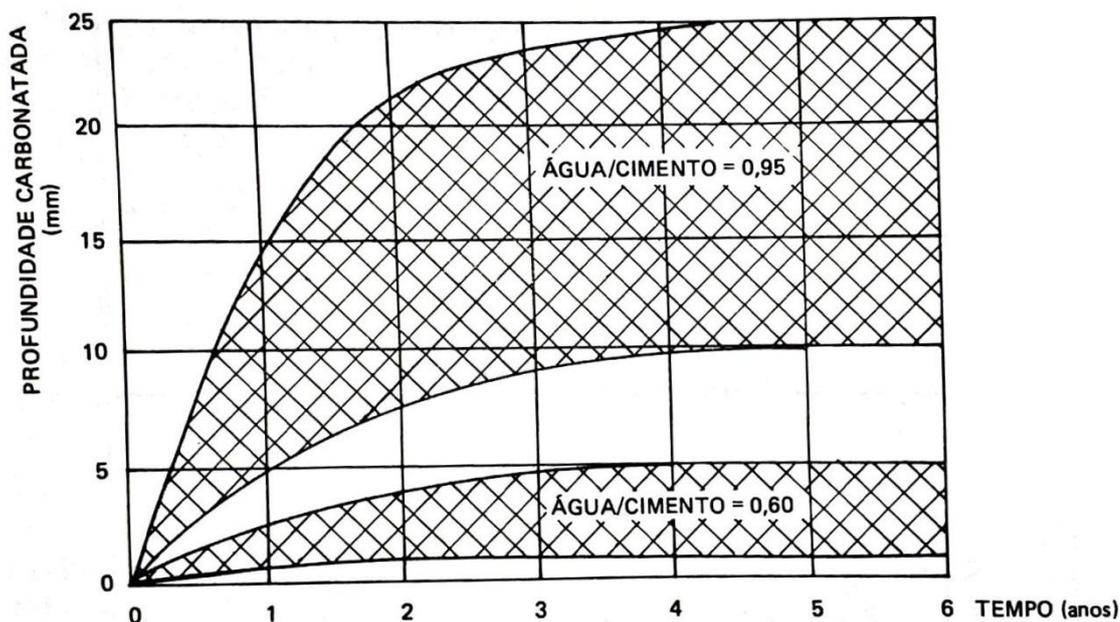
Conforme Helene (1986, p. 9), a velocidade e a espessura do fenômeno da carbonatação dos concretos possui grande variação e depende das características da execução e do meio ambiente. O autor cita, ainda, que as velocidades e conseqüentemente suas espessuras de carbonatação, começam de forma acelerada e vão reduzindo paulatinamente com o passar do tempo (figura 4).

Em virtude disso, Helene (1986, p. 10) conclui que:

[...] o cobrimento de concreto não pode e nem deve ser absoluto, qualquer que seja o concreto utilizado na moldagem do componente estrutural. Cada concreto, assim como cada região da estrutura e o meio ambiente é que determinarão o cobrimento mais adequado.

De acordo com Andrade (1992, p. 32), as barras de armaduras imersas no concreto corroem de forma muito rápida a partir da remoção da camada responsável pela proteção do aço. Segundo o autor isto acontece em conseqüência da umidade relativa e da água sempre presente no concreto.

Figura 4 – Variação da profundidade de carbonatação com tempo



(fonte: SORETZ⁴, 1967 apud HELENE 1986)

3.2.3 Corrosão induzida por cloretos

Os cloretos podem ser incorporados ao concreto por diferentes meios, entre eles:

- a) através da água de amassamento contaminada;
- b) através de aditivos retardadores de pega e endurecimento;
- c) através de agregados contaminados;
- d) penetração através dos poros do concreto.

Os cloretos são os agentes agressivos indutores de corrosão no aço mais importantes e danosos. Eles agem de forma rápida e em regiões pontuais, provocando a perda de seção transversal das barras de armaduras e podendo levar a estrutura a ruína.

Os cloretos são absorvidos fisicamente na superfície dos poros, ficando livres na solução contida nos poros do concreto, podendo despassivar e atingir a armadura. Os meios de

⁴ SORETZ, S. La protección contra la corrosión en los hormigones armado y pretensado. **Materiales de Construcción**, Madrid, n. 126, p. 30-54, 1967.

transportes que levam ao movimento e concentração iônica dos cloretos no concreto são os seguintes:

- a) **absorção:** caracteriza-se pela absorção de soluções líquidas ricas em íons de cloro, oriundas de sais dissolvidos, por exemplo, a névoa salina. Geralmente representa o primeiro passo da contaminação da estrutura de concreto armado;
- b) **difusão iônica:** a difusão iônica é o mecanismo de transporte predominante dos cloretos dentro do concreto saturado, e está relacionada à diferença de concentração de cloretos em diferentes ambientes do concreto;
- c) **permeabilidade:** caracteriza-se como absorção de soluções líquidas, mas sob pressão. É importante ressaltar que é tanto mais acentuada quanto maior for o diâmetro dos poros do concreto;
- d) **migração iônica:** Caracteriza-se como a migração de íons cloretos pelo próprio campo gerado por uma corrente elétrica do processo eletroquímico;

Não só o transporte de cloretos, mas outras substâncias dissolvidas, são influenciadas pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. O tamanho dos poros é de suma importância, modificando a velocidade do transporte. Os poros na pasta de cimento endurecida podem variar de tamanho segundo ordens de grandeza sendo classificados em poros:

- a) de ar aprisionados: decorrente dos processos de adensamento do concreto;
- b) de ar incorporados: obtidos através do uso de aditivos incorporadores de ar;
- c) capilares: obtidos de saída de água livre do concreto;
- d) de gel: devidos à água de gel.

3.3 ACELERAÇÃO DA CORROSÃO

Atualmente a construção civil tem exigido conhecimentos sobre materiais e técnicas eficientes para controlar a corrosão das armaduras. Este fato se faz necessário devido a grande importância e gravidade deste tema. A corrosão de armaduras prejudica criticamente a durabilidade e o desempenho das estruturas, provocando o encurtamento da sua vida útil.

A baixa qualidade dos materiais empregados na construção civil, aliada às deficiências nas etapas de produção do concreto e execução das estruturas compõem as causas do início da corrosão. Além disso, o mau posicionamento das armaduras e o cobrimento reduzido facilitam a chegada da frente de carbonatação ao aço.

Frente a grande quantidade de casos de corrosão de barras de armaduras, necessitou-se conhecer o comportamento dos materiais quando submetidos a este processo. Diversos modelos de ensaios foram propostos, com o objetivo de acelerar a corrosão das armaduras e analisar o desempenho dos materiais frente a este problema.

Os ensaios de corrosão acelerada podem ser ferramentas úteis quando se busca entender o modo como a corrosão de armaduras afeta as propriedades do aço no concreto ou quando se busca entender a forma de progressão e os efeitos da mesma. Porém, a partir destes ensaios dificilmente são extraídas correlações com as condições naturais de corrosão, já que os ensaios de corrosão acelerada promovem distorções nas condições de agressividade (GRAEFF, 2007, p. 47).

Para que a corrosão acelerada aconteça devem-se combinar soluções agressivas, frequentemente contendo cloretos, com a aplicação de uma diferença de potencial (d.d.p.), obtendo-se desta forma, uma indução eletroquímica. Nos experimentos mais antigos, os ensaios de corrosão acelerada eram realizados com a aplicação de d.d.p. constante e elevada, diminuindo o tempo de ensaio, mas podendo causar aquecimento dos corpos de prova e a distorção da dinâmica do processo de corrosão. Além disso, os ensaios com diferença de potencial constante causam grandes variações nas correntes de corrosão, provocando variações também nas taxas de corrosão, o que torna mais complicada a monitoração dos danos gerados (GRAEFF, 2007, p. 48-49).

De acordo com Graeff (2007, p. 49), “[...] em muitos casos, principalmente quando ocorre a fissuração, a corrente pode subir muito rapidamente num curto período de tempo, colocando em risco os equipamentos e podendo modificar a dinâmica do fenômeno.”. Ainda segundo o autor, devido a estes motivos, a aplicação de corrente constante pode ser uma boa solução para a propagação do processo corrosivo, já que é possível ter maior controle sobre a taxa de corrosão do material (GRAEFF, 2007, p. 49).

Um dos métodos utilizados para acelerar a corrosão de armaduras em elementos de concreto armado é o método CAIM, corrosão acelerada por imersão modificada. De acordo com Graeff (2007, p. 51-52), o CAIM é um método que foi desenvolvido na UFRGS e baseia-se na exposição de um corpo de prova de concreto armado a uma solução de cloretos, aliada ainda à aplicação de uma corrente elétrica, facilitando deste modo a migração dos cloretos para a armadura.

De acordo com Torres (2006, p. 54-55), o CAIM é um ensaio eletroquímico e tem como objetivo analisar a perda de massa das barras de armadura e a partir deste dado determinar as consequências da corrosão no aço. O autor considera ainda que o ensaio CAIM é uma experiência relevante e de grande utilidade na análise de obras deterioradas por corrosão.

Conforme Torres (2006, p. 57-58), por proporcionar uma rápida avaliação através de inspeção visual com o transcorrer do tempo, o CAIM consiste em uma importante ferramenta no que diz respeito às características da corrosão. O método possibilita examinar o grau de corrosão e definir a quantidade de aço que foi deteriorada, através da perda de massa, já que esta consiste num importante fator para se realizar uma correta avaliação das consequências ocasionadas pelo processo corrosivo.

Segundo Torres (2006, p. 57-58), o CAIM:

[...] é um ensaio que necessita de atenção e dedicação do pesquisador, pois o mesmo tem que acompanhar a evolução da corrente e registrar mudanças visuais nos cps desde a pesagem inicial até o final das armaduras. É necessário ainda adotar cuidados para garantir um correto posicionamento das barras nos cps e uma adequada cura do concreto. Além de tudo isso, o pesquisador deve ter sensibilidade suficiente para encerrar o ensaio se os cps estiverem em estado de deterioração muito avançado.

3.4 RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS

A crescente quantidade de manifestações patológicas que atingem as estruturas de concreto armado culminou na necessidade de se conhecer técnicas para recuperar as estruturas deterioradas. As anomalias que podem atingir o concreto armado têm diferentes origens, como por exemplo, erros de projeto e execução, baixa qualidade dos materiais empregados e agressividade ambiental.

A fim de se obter uma vida útil adequada, deve-se então tomar alguns cuidados, como por exemplo, levar em consideração nos projetos que o concreto se deteriora, necessitando de uma correta especificação de materiais e de manutenções periódicas. Deve-se também realizar um correto dimensionamento estrutural da edificação, considerando os fins para os quais a estrutura é projetada, a fim de evitar sobrecargas não consideradas. É necessário também

especificar adequadamente os cobrimentos de acordo com a agressividade ambiental da região.

Estando a estrutura degradada, deve-se então, executar a restauração da mesma, sendo esta viável economicamente. Para tanto, deve-se primeiramente realizar a preparação superficial do elemento de concreto armado a ser recuperado. A preparação superficial pode ser executada através de:

- a) polimento da superfície do elemento;
- b) lavagem e limpeza superficial;
- c) remoção de resíduos com soluções ácidas ou alcalinas;
- d) remoção de resíduos com jatos de água, areia, ar comprimido ou vapor;
- e) escovação manual;
- f) apicoamento;
- g) saturação;
- h) corte do concreto.

Para o caso de estruturas deterioradas pela corrosão de armaduras, o primeiro passo para a restauração do elemento é o corte e a remoção de todo o concreto deteriorado, permanecendo apenas o concreto em boas condições. De acordo com Souza e Ripper (1998, p. 115), o equipamento utilizado para o corte do concreto é o martelo demolidor que possui massa de 6 a 10 kg com o ponteiro terminando em ponta viva.

Neste serviço deve ser retirado todo e qualquer material que possa ser danoso para as barras de aço, promovendo um corte que vá além da armadura, com profundidade de pelo menos 2 cm ou então o diâmetro da barra (SOUZA; RIPPER, 1998, p. 115). Conforme Andrade (1992, p. 97), o concreto deve ser cortado além das barras de aço, para que toda a circunferência da barra possa ser limpa evitando assim, o início de uma pilha de corrosão eletroquímica ocasionada pela diferença de potencial entre o concreto envelhecido, que funciona como um ânodo e o material novo e passivado, que funciona como um cátodo.

De acordo com Souza e Ripper (1998, p. 116), para se obter uma melhor aderência entre o substrato e o concreto novo ou argamassa de reparo, a superfície interna deve ter suas arestas arredondadas e na forma de um talude de inclinação 1:3. Realizada a etapa de corte do concreto, a superfície do mesmo deve ser limpa obedecendo a seguinte ordem de jateamentos:

- a) de areia;
- b) de ar comprimido;
- c) de água.

A utilização de jatos de água é empregada para remover toda a camada de concreto deteriorada. A utilização dos jatos de areia exige que a areia esteja limpa, seca e isenta de matéria orgânica e após sua utilização esta deve ser descartada. A granulometria da areia utilizada deve ser compatível com o diâmetro da mangueira a fim de não entupi-la.

De acordo com Souza e Ripper (1998, p. 112), em alguns casos, esta técnica pode ser utilizada ao invés de se utilizar o apicoamento do concreto, na retirada da camada mais externa de concreto. Ainda segundo o autor, esta técnica apresenta a desvantagem ser menos produtiva do que se comparada a sua utilização apenas para a limpeza da superfície.

O jateamento de ar comprimido é utilizado para complementar a limpeza do substrato. Os jatos de ar comprimido têm por função remover as partículas em cavidades, devendo sempre os jatos serem utilizados do interior para o exterior. Pode ser utilizado também para a secagem de superfícies ou de fissuras antes da recuperação.

Para a limpeza de furos mais profundos, como os utilizados para a ancoragem de barras de aço, o ar comprimido é utilizado no modo de aspiração.

Em algumas situações, pode ser necessária a realização de escoramento ou até mesmo macaqueamento da estrutura, o que acaba demandando maior tempo e encarecendo muito a restauração.

No que diz respeito ao corte longitudinal, não existe uma fórmula que determine este comprimento, devendo este ser adotado pelo bom senso e experiência. Deve-se estar atento para a remoção completa dos agentes nocivos à estrutura, ou seja, o resíduo por mais imperceptível que seja de uma película oxidada pode comprometer todo o trabalho realizado, pois esta película pode promover a retomada do processo contaminante. Além disso, deve-se cuidar para não retirar exageradamente o concreto, pois a retirada de concreto são encarece a obra e é contra a segurança da estrutura (SOUZA; RIPPER, 1998, p. 116-117).

Conforme Souza e Ripper (1998, p. 117), caso haja a necessidade de se colocar novas barras de armadura, deve-se furar o concreto existente nas posições em que as barras são ancoradas e preencher com epóxi ou graute, antes da colocação da barra.

Após o preparo da superfície e limpeza das barras de armaduras, ou sua substituição quando necessário deve-se recompor a área recuperada através da aplicação de algum material de reposição. Pode-se citar:

- a) argamassa;
- b) graute;
- c) concreto.

A argamassa convencional empregada na recuperação da estrutura deve ser bem proporcionada, possuir baixa relação água/cimento e deve ser aplicada com o uso de fôrmas. Neste caso, deve-se assegurar que a aderência entre o concreto velho e a argamassa seja satisfatória.

O graute é utilizado quando se necessita de liberação rápida da estrutura, pois atinge altas resistências rapidamente, sendo possível retirar as fôrmas em 24 horas após o lançamento. Além disso, o graute possui boa fluidez, compacidade, uniformidade, é auto adensável e não apresenta retração. A cura do graute deve ser úmida e mantida por três dias.

No reparo com concreto convencional, devem ser utilizadas fôrmas para garantir que o local recuperado seja completamente preenchido com concreto. O concreto utilizado deve ser fluído, necessitando o uso de aditivos plastificantes. Deve também, ser utilizado aditivo expansivo para controle da retração do concreto. A cura deve ser úmida e realizada por no mínimo sete dias.

Pode-se também utilizar na recuperação de elementos estruturais o concreto projetado. Este tipo de concreto não necessita o uso de fôrmas, bastando apenas uma superfície para seu lançamento. Este sistema é largamente utilizado em concretagem de túneis, paredes de contenção e paredes de concreto armado.

O sistema consiste num processo contínuo de projeção de concreto ou argamassa sob pressão através de um bico projetor que lança o material com grande velocidade sobre a base. A

compactação é realizada através do impacto do concreto sobre a base, não necessitando a utilização de vibradores.

O concreto projetado pode ser de dois tipos: via seca ou via úmida. No concreto via seca os materiais secos, cimento e areia, são previamente misturados e transportados através do mangote até o bico projetor, onde então, é adicionada a água à mistura. No concreto via úmida, o concreto é produzido da forma comum e lançado pelo mango até o bico projetor. Neste caso, não há adição de água no bico projetor.

Ao concreto projetado podem ser adicionados aditivos, na ordem de 2% a 3%, visando reduzir a reflexão e aumentar a resistência. A cura deve ser úmida e realizada por no mínimo sete dias.

O concreto projetado tem como principal desvantagem a alta reflexão do material, devido à velocidade de lançamento. Todo material refletido deve ser descartado, não podendo este ser reutilizado em outro jateamento, visto que o concreto ao atingir o chão incorpora impurezas ou pode alterar a granulometria dos agregados.

3.5 MATERIAIS POZOLÂNICOS PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARO

O acelerado crescimento da indústria da construção civil, especialmente no território brasileiro, acabou gerando inúmeros problemas ligados a durabilidade das estruturas. Nesse sentido, a utilização de materiais pozolânicos como adição ou substituição ao cimento Portland pode proporcionar inúmeras vantagens quando comparado ao cimento Portland comum sem adições.

Guedert⁵ (1989 apud SANTOS, 2006), afirma que:

[...] o uso das pozolanas em adição ao cimento confere a concretos e argamassas características como:

⁵ GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico**. 1989. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

- a) menor calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), por reações atérmicas (pozolânicas);
- b) melhor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação um C-S-H com menor relação CaO/SiO₂ de menor basicidade;
- c) maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

Além disso, o uso de materiais pozolânicos em substituição a uma parte de cimento proporciona economia para a obra, devido ao menor custo, geralmente, das pozolanas em relação ao cimento Portland.

Desta forma, a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 1) define os materiais pozolânicos como “[...] materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes [...]”.

Ainda de acordo com a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 1) os materiais pozolânicos podem ser divididos em dois grupos: as pozolanas naturais e as pozolanas artificiais. Desta forma então se tem que as pozolanas naturais são aquelas cuja origem é vulcânica ou sedimentar com atividade pozalânica, sendo as vulcânicas, naturalmente com características petrográficas ácidas, com teor de sílica superior a 65%. Já as pozolanas artificiais decorrem de processos industriais ou então de tratamento térmico, com atividades pozolânicas.

Como neste trabalho os materiais pozolânicos avaliados serão a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz, estão descritos na sequência alguns dos conceitos mais relevantes para estes materiais.

3.5.1 Sílica ativa

A NBR 13956 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, p. 2) define a sílica ativa como “[...] material decorrente do processo de produção de silício metálico ou ligas de ferrosilício 75% em fornos elétricos, onde, durante o processo, é gerado o gás SiO

que, ao sair do forno, oxida-se formando partículas de SiO_2 , que são captadas por sistemas de filtros coletores [...]”.

De acordo com Mendes (2002, p. 21-22), a sílica ativa é a adição mineral mais utilizada na fabricação de concretos especiais. Isto ocorre especialmente porque a sílica ativa possui propriedades físico-químicas, como por exemplo, alta superfície específica e teor de SiO_2 amorfa superior a 85%, que proporcionam alta reatividade com os produtos formados a partir da hidratação do cimento Portland, favorecendo desta forma o empacotamento das partículas de cimento. Além disso, Dal Molin et al. (1996), afirmam que a utilização da sílica ativa como adição ao cimento Portland provoca a redução na porosidade, o aumento da aderência entre os agregados e a pasta, além de proporcionar o aumento da resistência mecânica do composto, promovendo desta forma, a redução da lixiviação e o aumento da resistência a abrasão.

Conforme Malier⁶ (1991 apud MENDES, 2002, p. 25), os efeitos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades do concreto ocorrem essencialmente devido ao efeito químico e ao efeito físico. De acordo com Dal Molin⁷ (1995 apud MENDES, 2002, p. 25), o efeito químico, também chamado de efeito pozolânico, ocorre quando a sílica ativa combina-se com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)), resultante da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o principal responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento. Segundo Mendes (2002, p. 25), o efeito físico, também conhecido como efeito microfiller, resulta do preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento.

Os efeitos químico e físico combinados provocam ligações mais fortes na microestrutura do concreto, devido à quantidade reduzida de poros e pela maior quantidade de compostos resistentes, provocando desta forma aumento na resistência mecânica, aumento das ligações entre a pasta e os agregados e a redução da permeabilidade.

⁶ MALIER, Y. The french approach to using HPC. *Concrete International*, p. 3-28, July. 1991.

⁷ DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. 1995. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

3.5.2 Metacaulim

A NBR 15894 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), define o metacaulim como “[...] produto de calcinação e moagem de argilominerais cauliníticos. Constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina.”. De acordo com Nita e John (2007, p. 4),

O metacaulim possui na sua composição química a alumina (Al_2O_3) e a sílica (SiO_2) perfazendo teores aproximados de 40% para alumina e 52% para sílica, num total de 92% em massa. Como impureza podem ser citados o quartzo, outros argilominerais, a mica, o feldspato, gipsita, componentes do ferro e materiais orgânicos.

De acordo com Barata (1998, p. 51), a exsudação da mistura é consideravelmente menor do que aquela apresentada no concreto convencional. Este fato está ligado ao tamanho extremamente pequeno das partículas de metacaulim, que proporcionam melhor empacotamento dos grãos de cimento.

Conforme Barata (1998, p. 53), as características físicas e a composição mineral da argila, utilizada para produção do metacaulim, podem influenciar na resistência mecânica do concreto. Ainda segundo o autor, para um concreto que necessite de alta resistência nas primeiras idades, deve ser utilizada pozolana constituída basicamente por caulinita termicamente ativada e de baixíssima finura. Esse tipo de pozolana, porém, libera grande quantidade de calor proveniente da alta reatividade do material.

De acordo com estudo de Zhang e Malhotra⁸ (1995 apud BARATA, 1998, p. 54), os autores mostraram que concretos com a adição de metacaulim apresentam rápido desenvolvimento nas primeiras idades, quando comparados ao concreto convencional e ao concreto com sílica ativa. Porém, para idades superiores aos 28 dias, os concretos com metacaulim apresentaram resistências ligeiramente menores do que aquelas apresentadas pelo concreto com sílica ativa. Ainda conforme os autores, em comparação com o concreto convencional os resultados obtidos pelo concreto com adição de metacaulim foram superiores.

⁸ ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1713-1725, 1995.

3.5.3 Cinza de casca de arroz

De acordo com Santos (2006, p. 39), a cinza de casca de arroz é: “Material resultante da queima da casca de arroz para a produção de energia calorífica empregada, por exemplo, no processo de secagem e parboilização dos grãos, junto às beneficiadoras do cereal [...]”. Ainda segundo Santos (2006, p. 39), “A cinza de casca de arroz constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina e com diâmetro médio das partículas inferior a $0,1\mu\text{m}$ é uma pozolana altamente reativa [...]”.

A coloração da cinza de casca de arroz pode variar, dependendo da presença de impurezas, do processo de combustão ou das transformações ocorridas no material durante a queima. A cinza de casca de arroz de coloração cinza escura possui maior teor de carbono, apontando a existência de matéria orgânica não queimada, enquanto que a coloração branca indica a oxidação completa do material (SANTOS, 2006, p. 40).

A cinza de casca de arroz pode ser uma superpozolana, com importantes atributos para a utilização como adição ao concreto. Porém, para que esta cinza se torne uma superpozolana, depende de alguns fatores como: temperatura da queima na obtenção da cinza e o tempo de exposição a esta temperatura. Além disso, a alta superfície específica, obtida através de um maior tempo no processo de moagem, e o diâmetro médio das partículas extremamente reduzido, contribuem para que a cinza tenha um alto grau de pozolanicidade (SANTOS, 2006, p. 41).

A cinza de casca de arroz utilizada como adição ao concreto tem apresentado efeitos benéficos tanto no estado fresco quanto endurecido. No estado fresco, quando adicionadas pequenas quantidades de cinza ao concreto, a cinza de casca de arroz aumenta a trabalhabilidade e reduz a segregação e exsudação do concreto (KUNTZ⁹, 2006 apud PEDROZO, 2008, p. 54). De acordo com Pedrozo (2008, p. 54), no estado endurecido, a adição de cinza de casca de arroz promove a densificação da matriz de pasta e da interface pasta/agregado, aumentando desta forma a resistência mecânica do concreto e reduzindo a permeabilidade do material.

⁹ KUNTZ, L. M. **The “Greening” of the Concrete Industry: Factors contributing to Sustainable Concrete.** 2006. 41f. Thesis (Master of Engineering) – Massachusetts Technology Institute, Cambridge, 2006.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o intuito atingir os objetivos da pesquisa e comprovar a hipótese apresentada no capítulo 2, foi elaborado um plano experimental. Neste capítulo são apresentados os procedimentos realizados em laboratório, assim como os métodos, equipamentos e materiais utilizados.

4.1 PLANO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental só foi possível, a partir da elaboração de um plano experimental, no qual foram descritas todas as etapas a serem cumpridas durante o experimento. Durante esta etapa foram tomadas as principais decisões que norteiam esta pesquisa. Ficou determinado que fossem moldadas cinco vigas, com dimensões 7x14x130 cm e com as armaduras de flexão e cisalhamento conforme descritas no item 4.3 deste trabalho. Decidiu-se também, que seriam moldados nove corpos de prova cilíndricos, de dimensões 10 cm e diâmetro e 20 cm de altura, para o acompanhamento da evolução da resistência à compressão do concreto, sendo ensaiados três corpos de prova a cada idade (7, 14 e 28 dias). Foi decidido também que seriam moldados outros três corpos de prova, com as mesmas dimensões dos anteriores, com objetivo de medir o módulo de elasticidade do concreto utilizado aos 28 dias.

A resistência mecânica do concreto utilizado e o traço para que esta resistência pudesse ser alcançada, foram também definidos durante o plano experimental, assim como o tempo de cura do concreto em câmara úmida. Foi decidido também que, para provocar a corrosão nas barras de armaduras seria utilizado o método CAIM por trinta dias. Determinou-se também o modo de recuperação das vigas, iniciando pela remoção do concreto deteriorado, passando pela limpeza das armaduras e pela pintura com zinco antes do fechamento com argamassa.

Ainda no plano experimental foi decidido que seria utilizado apenas o ensaio de resistência à flexão para determinar as cargas de ruptura das vigas e o deslocamento entre o concreto e as argamassas. Definiu-se que deveria ser realizado tratamento superficial na região de apoio das vigas e nos locais de aplicação da carga vertical. Decidiu-se também que seria utilizado um

deflectômetro para medir o deslocamento vertical do centro das vigas, e outro deflectômetro com objetivo de medir o deslocamento lateral entre as argamassas e o concreto.

4.2 MATERIAIS

A seguir são descritos materiais utilizados no procedimento experimental e suas características.

4.2.1 Cimento

O cimento utilizado para a moldagem das vigas de concreto e para a produção das argamassas de reparo foi o CP-V ARI da empresa Nacional. Tabela 1 apresenta as características do material.

Tabela 1 – Especificação para o cimento CP-V Nacional

Área específica - Blaine (m ² /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/cm ³)	3,11	-	NM 23/01
Diâmetro médio (µm)	11,06		
Perda ao Fogo (%)	2,56	≤4,5	NM 18/04
SiO ₂ (%)	17,83		

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2.2 Areia

A areia utilizada para a moldagem das vigas e para a produção das argamassas de reparo é oriunda do Rio Jacuí, caracterizada como areia média.

A composição granulométrica da areia está mostrada na tabela 2.

Tabela 2 – Composição granulométrica da areia utilizada na pesquisa

Abertura (mm)	% retido	% retido acumulado
6,30	0,00	0,00
4,75	0,15	0,15
2,36	3,84	3,99
1,18	9,96	13,94
0,60	29,88	43,82
0,30	45,25	89,07
0,15	0,13	89,21
Fundo	10,79	100,00
Diâmetro máximo característico = 2,36		
Módulo de finura = 2,40		
Massa específica = 2,63 g/cm ³		
Umidade = 0,3%		

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2.3 Brita

A brita utilizada para a moldagem das vigas é de origem basáltica, e a composição granulométrica está mostrada na tabela 3.

Tabela 3 – Composição granulométrica da brita utilizada na pesquisa

Abertura (mm)	% retido	% retido acumulado
25	0,00	0,00
19	4,80	4,80
12,5	75,70	80,40
9,5	18,90	99,30
6,3	0,70	100,00
4,75	0,00	100,00
2,36	0,00	100,00
Fundo	0,00	100,00
Diâmetro máximo característico = 19 mm		
Módulo de finura = 7,04		
Massa específica = 2,90 g/cm ³		

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2.4 Materiais pozolânicos

Os materiais pozolânicos utilizados nesta pesquisa para a produção das argamassas de reparo foram a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz. As tabelas 4 e 5 mostram a composição química e algumas propriedades físicas destes materiais pozolânicos.

Tabela 4 – Composição química dos materiais pozolânicos utilizados para as argamassas de reparo

Composição química (% em massa)	Sílica Ativa	Metacaulim	Cinza de Casca de Arroz
CaO	0,5	0,03	1,9
SiO₂	94	52,75	89,8
Al₂O₃	0,06	35,66	-
Fe₂O₃	0,03	4,09	0,2
MgO	1,1	0,65	1,6
Na₂O	-	-	-
K₂O	-	0,94	6,3
SO₃	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 5 – Propriedades físicas dos materiais pozolânicos utilizados para as argamassas de reparo

Propriedades Físicas	Sílica Ativa	Metacaulim	Cinza de Casca de Arroz
Massa específica (g/cm³)	2,22	2,6	2,03
Diâmetro médio (µm)	0,2	20,74	13,53
Perda ao fogo (%)	2,5	2,91	3,62

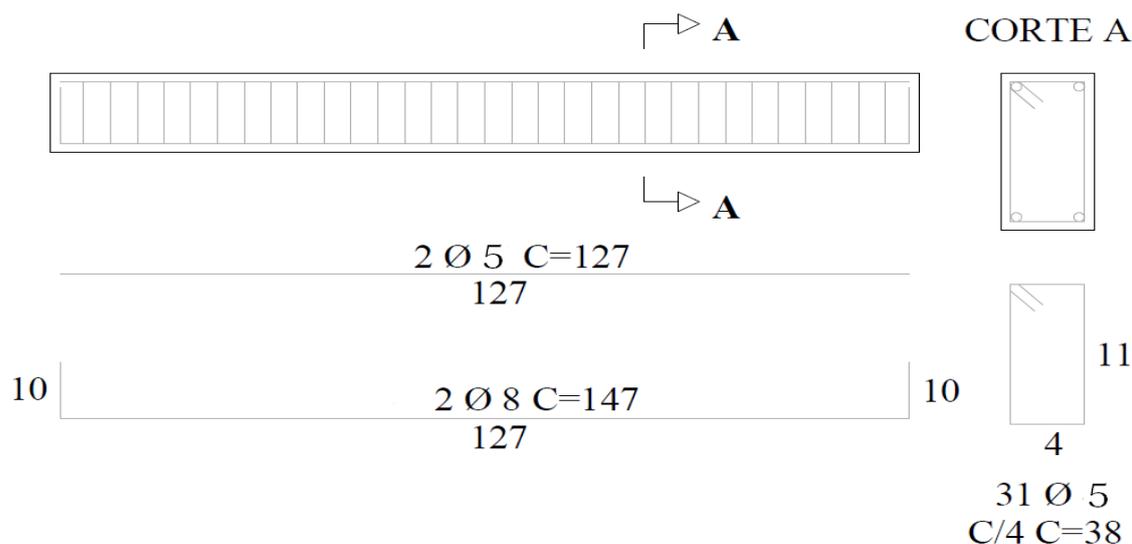
(fonte: elaborado pelo autor)

4.3 MONTAGEM DAS ARMADURAS

Uma vez definido o plano experimental, descrito em detalhes no item anterior, partiu-se para a realização dos experimentos. Para tanto, a primeira etapa consistiu em montar as armaduras das vigas. O aço utilizado foi o CA50, com resistência característica de 500MPa. As barras de aço utilizadas no experimento foram previamente cortadas e dobradas nos comprimentos estabelecidos no plano experimental.

As vigas moldadas apresentam as seguintes dimensões (7cm x 14cm x 130cm). A configuração das armaduras das vigas consistiu em duas barras longitudinais positivas com 8 mm de diâmetro, sendo o comprimento reto de 127 cm e ganchos nas extremidades de 10cm. Já para as barras negativas foram utilizadas duas barras com 5 mm de diâmetro, com comprimento reto de 127cm. A armadura negativa foi utilizada apenas para a amarração dos estribos, não possuindo função estrutural. Para a armadura transversal foram utilizados estribos com 5mm de diâmetro, com 38cm de comprimento e espaçados a cada quatro centímetros (figura 5). Esta configuração foi adaptada da configuração adotada por Graeff (2007), para que na etapa de aceleração corrosão se obtivem resultados próximos. Porém, ao invés de utilizar as barras com diâmetro de 4,2 mm – utilizadas por Graeff (2007) – foram utilizadas barras com 5 mm de diâmetro, pois não são mais fabricadas barras de aço com o diâmetro de 4,2 mm pela siderúrgica fornecedora do aço para a pesquisa.

Figura 5 – Detalhamento da armadura



(fonte: adaptado de GRAEFF, 2007)

A primeira etapa da montagem das armaduras consistiu em isolar os cantos dos estribos que têm contato direto com a armadura longitudinal positiva. Isto foi realizado com o intuito de diminuir posteriormente, na etapa de corrosão acelerada, a corrosão da armadura transversal, visto que a armadura longitudinal positiva foi corroída através da aplicação de corrente elétrica, e esta poderia ser induzida nos estribos em contato com estas barras. Para tanto, foi utilizada fita isolante, nos cantos dos estribos em contato com as barras de aço positivas (figura 6 e 7).

Figura 6 – Isolamento dos cantos dos estribos



(fonte: foto do autor)

Figura 7 – Estribos isolados em contato com a armadura longitudinal positiva



(fonte: foto do autor)

A etapa seguinte da montagem das armaduras foi então a marcação das posições dos estribos nas barras longitudinais positivas. Para tanto, primeiramente com auxílio de uma trena foi marcada a posição do centro da barra, posição onde foi colocado o estribo central. A partir desta posição, foram então marcadas as posições dos demais estribos, sendo eles espaçados a cada 4cm, resultando em quinze estribos para cada lado do estribo central (figura 8).

Com todos os estribos posicionados, partiu-se para a amarração dos mesmos. A amarração iniciou-se pela fixação dos estribos nas barras de armadura positivas (figura 9), a partir de uma das extremidades até a outra. Com todos os estribos fixados na armadura positiva foram colocadas às barras de armadura negativas e nelas foram fixados os primeiros três estribos, sendo um em cada extremidade das barras de aço e outro na região central, garantindo desta forma que o posicionamento das barras. A partir daí, fixou-se então o restante dos estribos na armadura negativa, encerrando a montagem da armadura (figura 10).

Figura 8 – Posicionamento dos estribos



(fonte: foto do autor)

Figura 9 – Fixação dos estribos na armadura positiva



(fonte: foto do autor)

Figura 10 – Armadura montada



(fonte: foto do autor)

O passo seguinte do experimento foi a colocação de um fio de cobre – para garantir a diferença de potencial durante o ensaio CAIM – sobre as barras de armadura positivas. A capa de proteção do fio de cobre foi então removida e cortada em pequenos tubos de aproximadamente 2 cm, sendo estas colocadas novamente no fio de cobre para amarração à armadura longitudinal (figura 11). O objetivo da recolocação da capa protetora do fio de cobre em pequenos tubos foi evitar o contato direto do fio com as barras de aço, promovendo desta forma uma corrosão homogênea e diminuindo a probabilidade de perda de seção localizada das barras de aço.

Figura 11 – Fio de cobre sobre as barras de positivas



(fonte: foto do autor)

As fôrmas de madeira foram previamente montadas, visto que, fôrmas com as dimensões das vigas são utilizadas para outros experimentos no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), onde esta pesquisa foi desenvolvida. Desta forma, após a fixação do fio de cobre sobre as barras de aço, as armaduras foram então posicionadas nas fôrmas (figura 12) para na etapa seguinte serem concretadas. Para garantir-se o cobrimento necessário, foram utilizados espaçadores de argamassa (figura 13).

Figura 12 – Posicionamento das armaduras nas fôrmas



(fonte: foto do autor)

Figura 13 – Espaçadores de argamassa



(fonte: foto do autor)

4.4 CONCRETAGEM

Inicialmente, foi estabelecido o traço do concreto utilizado para moldar as vigas, bem como a quantidade de insumos necessários para a concretagem das cinco vigas. O traço utilizado seguiu a proporção de 1:2,35:3,44 (cimento:areia:brita), com relação água/cimento (a/c) igual a 0,66. Posteriormente, através de uma tabela padrão, foram estabelecidas as quantidades de concreto em volume e peso para as cinco vigas e para os corpos de prova de controle, conforme descrito na tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo do volume de concreto

número cp cilindricos	diâmetro cp (cm)	altura cp (cm)		concreto (cm ³)	concreto (kg)	Litros
12	10	20		18.849,56	58,81	23,04
número cp prismaticos	comprimento cp (cm)	altura cp (cm)	largura cp (cm)	concreto (cm ³)	concreto (kg)	
5	130	14	7	63.700,00	198,73	77,87
obs.: diâmetro máximo agregado = 19 mm						
					257,54	100,92

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos dados da tabela 1, foi possível então, calcular a quantidade de materiais necessários para a produção do concreto (tabela 7).

Tabela 7 – Traço do concreto

	Quantidade	Cimento	Areia	Brita	A/C
		(kg)	(kg)	(kg)	(l)
		1	2,35	3,44	0,66
cp cilíndricos	12	8,65	20,35	29,79	5,71
cp prismático	5	29,27	68,76	100,66	19,31
	TOTAL	37,92	89,11	130,45	25,02

(fonte: elaborado pelo autor)

O passo seguinte para a produção do concreto consistiu em pesar os materiais conforme dados da tabela 7 (figura 14). O concreto foi produzido em uma betoneira de eixo inclinado. A figura 15 mostra os materiais pesados e separados para a concretagem.

Figura 14 – Pesagem dos materiais



(fonte: foto do autor)

Figura 15 – Materiais para produção do concreto



(fonte: foto do autor)

A etapa subsequente foi a produção propriamente dita do concreto. Os materiais foram então levados até a betoneira e misturados até que se obtivesse uma mistura homogênea e consistente. A partir deste ponto foi realizada a concretagem das vigas e corpos de prova. O concreto foi lançado nas fôrmas e adensado com vibrador de imersão. Já para o adensamento do concreto nos corpos de prova foi utilizada mesa vibratória. A etapa de adensamento do concreto está mostrada na figura 16, enquanto que a figura 17 mostra os corpos de prova e as vigas após o término da concretagem.

Figura 16 – Adensamento do concreto



(fonte: foto do autor)

Figura 17 – Concretagem finalizada



(fonte: foto do autor)

Finalizada a concretagem as vigas foram curadas por vinte e oito dias em câmara úmida. Os corpos de prova cilíndricos, da mesma forma como as vigas, também foram curados em câmara úmida, mas com variação quanto ao tempo de cura, devido ao ensaio de resistência à compressão em diferentes idades do concreto (7, 14 e 28 dias), conforme descrito a seguir.

4.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os ensaios de resistência à compressão – utilizados para acompanhar a evolução da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo – foram realizados aos 7, 14 e 28 dias após a concretagem. Para diminuir as variabilidades nos resultados do ensaio, os corpos de prova foram retificados em máquina retificadora (figura18). Desta forma, contribui-se para diminuir a concentração de cargas e uma eventual distorção dos resultados. Foram utilizados 3 corpos de prova medindo 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para cada idade de ruptura.

Figura 18 – Retífica dos corpos de prova



(fonte: foto do autor)

A taxa de aplicação de cargas utilizada para o ensaio de compressão foi de 0,45MPa por segundo, de acordo com a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007). A figura 19, a seguir, mostra um corpo de prova antes e após a ruptura por compressão.

Figura 19 – Corpo de prova antes e após ruptura por compressão



(fonte: foto do autor)

O ensaio de módulo de elasticidade do concreto foi realizado aos 28 dias após a concretagem. Para tanto, foram moldados 3 corpos de prova medindo 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, que assim como os corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão, foram retificados em máquina retificadora, com o objetivo de diminuir a concentração de cargas nos cps.

O ensaio de módulo de elasticidade consiste na aplicação de cargas de compressão nos corpos de prova até um limite de 30% da tensão de ruptura, valor este obtido do ensaio de resistência à compressão, e medição das deformações nos mesmos corpos de prova causadas pela aplicação desta carga, utilizando para a medição da deformação um compressômetro (figuras 20 e 21). A força aplicada e a deformação causada, por esta força, são medidas a cada 0,5 segundos até que seja atingido o valor limite de 30% da tensão de ruptura. A partir destes dados é então gerado um gráfico (tensão x deformação) para o corpo de prova. O módulo de elasticidade do concreto é obtido pela inclinação da curva gerada pelos pontos do gráfico. Devem ser considerados para a obtenção do módulo de elasticidade os valores compreendidos entre as tensões de 0,5MPa e 30% da tensão de ruptura, valor este igual a 9MPa para o concreto de 30MPa. Desta forma, o módulo de elasticidade (E_{ci}), em GPa, é definido pela seguinte equação:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (\text{equação 1})$$

sendo:

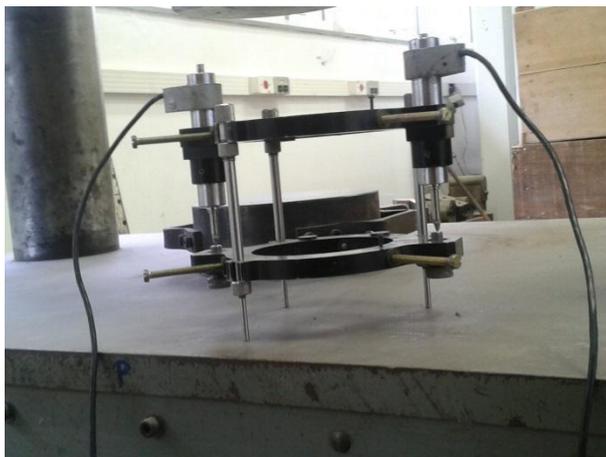
σ_b = tensão correspondente a 30% da tensão de ruptura, em MPa;

0,5 = tensão básica, em MPa;

ε_b = deformação específica média dos corpos de prova sob tensão σ_b ;

ε_a = deformação específica média dos corpos de prova sob tensão 0,5MPa.

Figura 20 – Compressômetro



(fonte: foto do autor)

Figura 21 – Ensaio de módulo



(fonte: foto do autor)

4.6 ACELERAÇÃO DA CORROSÃO

O método escolhido para induzir a aceleração da corrosão nas vigas foi o método CAIM. O modelo utilizado é o mesmo proposto por Graeff (2007), que para obter um maior controle sobre os graus de corrosão utiliza uma taxa de corrente constante de $500\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Considerando que as barras a serem corroídas possuem 8 mm de diâmetro e 127 cm de

comprimento, e aplicando a taxa de corrente referida, tem-se que a corrente que deve ser aplicada no sistema é de 320 mA, para ambas as barras da armadura longitudinal.

Para a realização do ensaio de aceleração da corrosão, as vigas foram posicionadas em containers, com solução de cloretos, formados por plásticos de PVC transparentes dobrados formando uma caixa, de maneira que a evolução da deterioração pelos produtos de corrosão do ensaio pudesse ser acompanhada. Para evitar o contato da base das vigas com o fundo das caixas e, principalmente, para que a solução de cloretos pudesse passar sob as vigas, foram colocados espaçadores plásticos entre o fundo da caixa e a base das vigas.

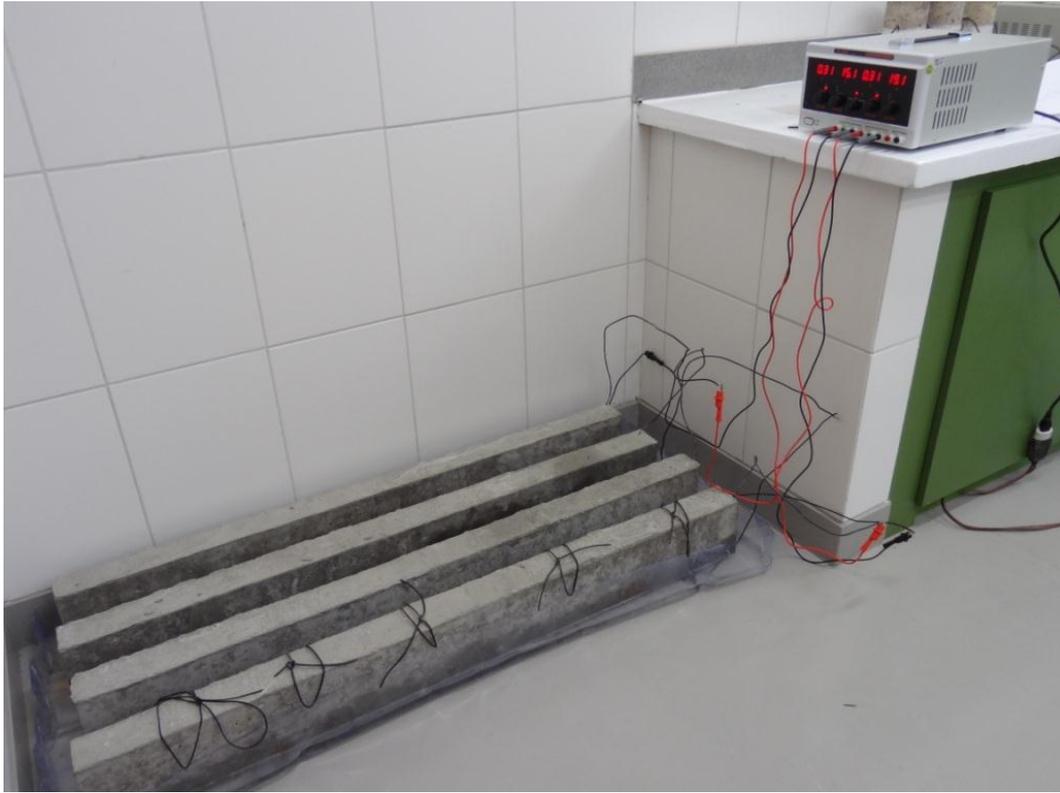
Com as vigas devidamente posicionadas nas caixas, a solução de cloretos de 35g/l foi finalmente posta nas bacias plásticas até uma altura de 3 cm do fundo caixas, garantindo deste modo que a solução esteja na mesma altura do cobrimento das vigas (conforme procedimento do método CAIM) . No passo seguinte cada duas vigas foram ligadas em série, permitindo que uma única fonte de alimentação fosse utilizada neste experimento (figura 22), de forma que os fios que foram posicionados sobre as barras de aço das vigas, ainda na etapa de montagem das armaduras, foram ligados nos polo positivos das fontes. Outro fio de cobre teve então uma das extremidades ligada ao polo negativo da fonte e a outra extremidade colocada na solução de cloretos (figura 23). Foram então ajustadas as correntes nas fontes, de modo que as diferenças de potencial pudessem variar de acordo com a resistência do concreto, mantendo a corrente sempre constante. A partir deste ponto, a evolução do experimento foi acompanhada semanalmente, por um período de 30 dias, conforme mostram as figuras 24 a 29. O período de 30 dias foi calculado tomando-se como base um grau de corrosão esperado de 10% de perda de massa. O tempo foi calculado de acordo com o modelo proposto por Graeff (2007).

Figura 22 – Correntes e diferenças de potencial ajustadas na fonte



(fonte: foto do autor)

Figura 23 – Ligações do método CAIM



(fonte: foto do autor)

Figura 24 – 1ª semana do método CAIM



(fonte: foto do autor)

Figura 25 – 2ª semana do método CAIM



(fonte: foto do autor)

Figura 26 – 3ª semana do método CAIM



(fonte: foto do autor)

Figura 27 – 4ª semana do método CAIM



(fonte: foto do autor)

Figura 28 – Produtos de corrosão após conclusão do CAIM



(fonte: foto do autor)

Figura 29 – Fissura causada pela corrosão



(fonte: foto do autor)

4.7 RECUPERAÇÃO DAS VIGAS

Decorridos os 30 dias destinados à aceleração da corrosão pelo método CAIM, iniciou-se a fase de recuperação das vigas. Esta etapa começou com a remoção de todo o concreto deteriorado, sendo utilizadas para isso as ferramentas ponteira e marreta (figura 30).

Figura 30 – Remoção do concreto deteriorado



(fonte: foto do autor)

O concreto deteriorado deve ser removido até que a armadura longitudinal corroída esteja totalmente exposta, facilitando deste modo a limpeza das barras. A armadura deve então ser escovada, com escova de cerdas de aço, de forma a remover todos os resíduos gerados pela corrosão do aço (figura 31). Além de escovar as barras de aço, foi utilizada uma lixa para garantir que todas as partículas provenientes dos produtos de corrosão fossem removidas nos locais em que a escovação era difícil de ser executada. A figura 32 mostra uma comparação entre uma armadura corroída com e sem a remoção dos resíduos. As armaduras expostas foram pintadas com o primer **Nitoprimer ZN**, que tem como objetivo proteger as armaduras nas regiões reparadas. A pintura foi executada com pincel e aplicada em duas demãos, com intervalo entre aplicações de 40 minutos (figura 33).

Figura 31 – Armadura corroída em processo de escovação



(fonte: foto do autor)

Figura 32 – Armadura corroída antes e após escavação



(fonte: foto do autor)

Figura 33 – Pintura da armadura corroída com Nitoprimer ZN



(fonte: foto do autor)

No dia seguinte à aplicação do primer as vigas em processo de recuperação estavam prontas para a aplicação das argamassas de reparo. Foi então estimada a quantidade em quilogramas de materiais necessários para cada viga, a partir do cálculo de um volume médio, conforme mostram as tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Cálculo do volume de argamassa

	comprimento (cm)	altura média (cm)	largura (cm)	Volume (cm³)
Viga 1	130	9	7	8190
Viga 2	130	10	7	9100
Viga 3	130	10	7	9100
OBS.:	viga 1 - adição de sílica ativa; viga 2 - adição de metacaulim; viga 3 - adição de cinza de casca de arroz			

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 – Dosagem das argamassas

	cimento (kg)	areia (kg)	silica ativa (kg)	metacaulim (kg)	cinza de casca de arroz (kg)	água (l)
Viga 1	5,65	16,95	0,565	-	-	3,107
Viga 2	6,28	18,84	-	0,628	-	3,454
Viga 3	6,28	18,84	-	-	0,628	3,454

(fonte: elaborado pelo autor)

Os materiais foram pesados conforme a tabela 9, e em seguida levados à argamassadeira para serem misturados até se obter a consistência desejada. As figuras 34, 35 e 36 mostram uma das vigas em processo de restauração juntamente com os materiais que são utilizados para a produção da argamassa de reparo com sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, respectivamente. A figura 37 mostra a mistura dos materiais em argamassadeira, já com a consistência ideal para reparo. A primeira argamassa executada foi aquela que possui como adição a sílica ativa, sendo seguida pela argamassa com adição de metacaulim e finalmente pela argamassa com adição de cinza de casca de arroz.

Figura 34 – Materiais para a argamassa de sílica ativa



(fonte: foto do autor)

Figura 35 – Materiais para a argamassa de metacaulim



(fonte: foto do autor)

Figura 36 – Materiais para a argamassa de cinza de casca de arroz



(fonte: foto do autor)

Figura 37 – Argamassa de reparo pronta para aplicação



(fonte: foto do autor)

As argamassas foram produzidas e em seguida foi executado o lançamento das mesmas nas vigas de concreto (figura 38). A etapa de lançamento das argamassas foi realizada por um especialista, devido à necessidade da aplicação de energia adequada no lançamento para uma melhor compactação das argamassas, garantindo desta forma uma melhor aderência da argamassa no substrato de concreto. A aplicação da argamassa de reparo foi iniciada pelas laterais das vigas pela necessidade de serem aplicadas sem a utilização de fôrmas laterais. Após a aplicação nas laterais foram colocadas fôrmas nas laterais das vigas (figura 39), facilitando desta maneira a aplicação da argamassa no restante da viga. Além disso, as fôrmas laterais serviram para também para garantir a altura original da viga.

As fôrmas foram fixadas nas vigas através da utilização de grampos do tipo sargento, evitando que as fôrmas abrissem durante o lançamento das argamassas (figura 40). Finalizada a aplicação das argamassas de reparo, foi então realizado o nivelamento da superfície argamassada (figura 41), encerrando desta forma a execução do reparo. As vigas foram então levadas para a câmara úmida, onde permaneceram por um período de 28 dias (figura 42).

Figura 38 – Lançamento da argamassa na viga de concreto



(fonte: foto do autor)

Figura 39 – Lançamento da argamassa na viga de concreto com auxílio de fôrmas



(fonte: foto do autor)

Figura 40 – Grampo tipo sargento



(fonte: foto do autor)

Figura 41 – Viga com a superfície argamassada nivelada



(fonte: foto do autor)

Figura 42 – Viga em processo de cura em câmara úmida



(fonte: foto do autor)

Durante a realização dos reparos, foram também moldados três corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura para cada argamassa de reparo. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e colocados em câmara úmida juntamente com as vigas. Após 28 dias, foi obtida a resistência à compressão destas argamassas, visando verificar uma possível diferença de comportamento entre as argamassas.

4.8 INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS

Para medir tanto o desempenho mecânico na flexão, como um indicativo da aderência entre as argamassas de reparo e concreto das vigas, foi necessário instrumentá-las de modo a se obter estes resultados. Para isso, optou-se pela utilização de um deflectômetro para medir os deslocamentos verticais no centro do vão de todas as vigas e outro deflectômetro para medir um possível deslocamento existente entre o concreto e as diferentes argamassas. Além disso, ainda foi utilizada uma célula de carga, para a medição da carga aplicada nas vigas até a ruptura.

O deflectômetro para medir os deslocamentos verticais foi fixado na base de apoio para o ensaio de resistência à flexão e sua haste de medida em uma chapa metálica fixada no centro da viga (figura 43). Desta forma, a cada incremento de carga aplicada na viga era possível medir a flecha causada por esta carga.

Figura 43 – Deflectômetro para medidas de deslocamento vertical da viga



(fonte: foto do autor)

Para as medidas de deslocamento entre o concreto e a argamassa de reparo, o deflectômetro foi instalado no concreto, parte superior da viga, e sua haste de medida na parte lateral da viga, em contato com a argamassa (figura 44). Desta forma, a cada incremento de carga pode ser medido o deslocamento relativo entre os materiais.

Figura 44 – Deflectômetro para medida de deslocamento lateral



(fonte: foto do autor)

4.9 ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS

O ensaio escolhido para a realização de uma comparação entre a eficiência das argamassas de reparo, tanto em relação ao desempenho global da estrutura, quanto em relação a um indicativo da aderência ao concreto das vigas, foi o ensaio flexão a quatro pontos. No entanto, para que o ensaio fosse possível de ser realizado foi necessária a realização de um polimento superficial nos pontos de apoio das vigas e nos pontos de aplicação das cargas.

O tratamento realizado na superfície das vigas consistiu em inicialmente marcar: a região dos apoios das vigas, o centro das vigas e os pontos onde as cargas seriam aplicadas. Para isso, utilizou-se uma trena, um lápis e um esquadro. O apoio das vigas foi locado a 10 cm das extremidades e as regiões de aplicação das cargas a 20 cm para a esquerda e a 20 cm para a direita do centro das vigas (figuras 45 e 46), de maneira a garantir que as cargas fiquem igualmente espaçadas.

Figura 45 – Marcação do apoio



(fonte: foto do autor)

Figura 46 – Esquadro para marcação do apoio



(fonte: foto do autor)

A partir da marcação de todos os pontos necessários para a realização do ensaio, foi necessário então regularizar estes pontos com uma esmirilhadeira, evitando desta forma, que a viga se instabilizasse com a aplicação das cargas (figura 47).

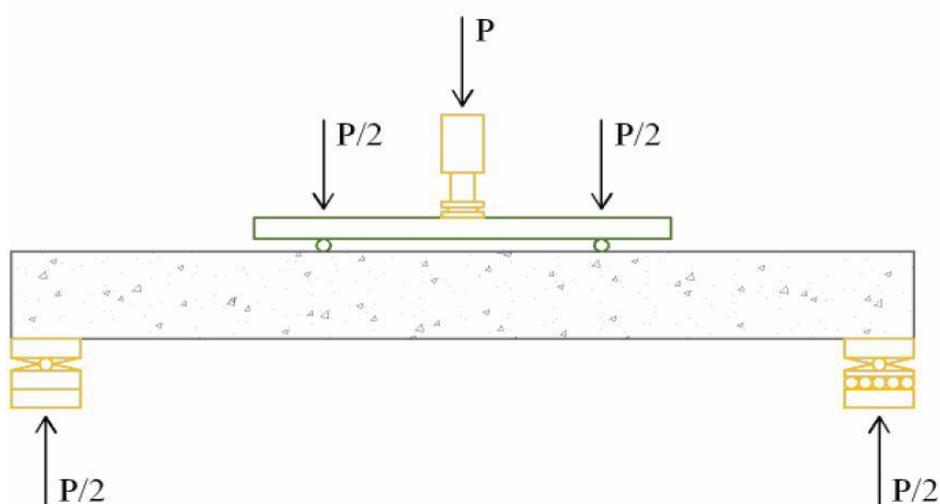
Figura 47 – Regularização da superfície da viga



(fonte: foto do autor)

Com as superfícies de apoio e de aplicação de cargas nivelados foi possível iniciar o ensaio de flexão a quatro pontos. Este ensaio consiste em apoiar as vigas sobre um apoio simples e um apoio duplo com aplicação de duas cargas concentradas de igual módulo e dispostas simetricamente em relação ao eixo central da viga (figura 48).

Figura 48 – Esquema de carregamento das vigas



(fonte: adaptado de GRAEFF, 2007)

As vigas são posicionadas sobre os apoios e nelas são fixados o deflectômetro para medição das flechas, em todas as vigas, e o deflectômetro para medição do escorregamento entre os materiais, nas vigas recuperadas. Além disso, deve ser posicionado sobre a viga o aparelho responsável por distribuir a carga concentrada nos dois pontos especificados. A célula de carga é então acoplada ao aparelho de transferência de cargas e o ensaio é iniciado (figura 49 e 50).

Figura 49 – Célula de carga



(fonte: foto do autor)

Figura 50 – Medidor de carga



(fonte: foto do autor)

Inicialmente os deflectômetros devem ser calibrados. Para isso, deve ser realizada uma leitura no deflectômetro e logo em seguida deve ser aplicada uma carga, aproximadamente 300 kgf, descarregando em seguida, e verificando se a leitura do deflectômetro volta à posição inicial. Este procedimento deve ser realizado outras duas vezes e caso a leitura do deflectômetro seja a inicial, ou muito próxima a esta, inicia-se o ensaio.

A leitura dos deflectômetros é anotada para a carga de zero quilograma-força e então é aplicado o primeiro incremento de carga de 500 kgf. Para esta carga deve ser realizada a leitura dos deflectômetros, e a aplicação de novo incremento de carga de 500 kgf, e assim sucessivamente até a ruptura da viga (figura 51). A figura 52 mostra uma das fissuras provocadas pela flexão do elemento.

Figura 51 – Flecha da viga após ruptura



(fonte: foto do autor)

Figura 52 – Fissuras provocadas pela flexão



(fonte: foto do autor)

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados durante o programa experimental. São apresentados os resultados referentes aos ensaios de resistência à compressão do concreto, bem como os resultados obtidos para o ensaio de módulo de elasticidade do concreto. Ainda neste capítulo, são apresentados também os resultados atingidos nos ensaios de flexão a quatro pontos e também os valores resultando do ensaio de compressão nas argamassas de reparo.

5.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Os ensaios de resistência à compressão no concreto são apresentados na tabela 10 a seguir, mostram a carga, e conseqüentemente, a tensão necessária para romper os corpos de prova.

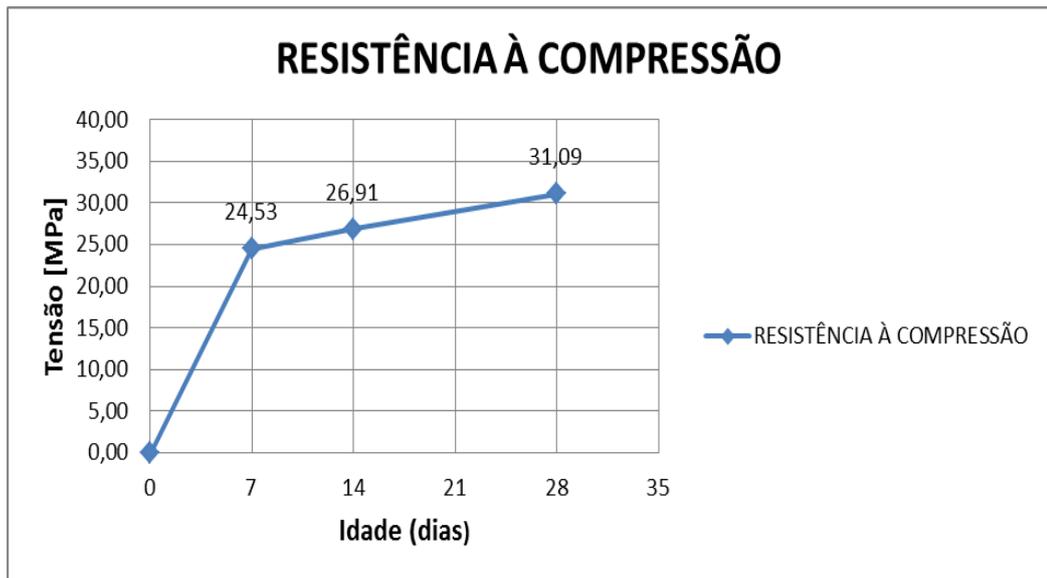
Tabela 10 – Resistência à compressão do concreto

Corpo de prova	7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS	
	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)
CP1	193	24,57	212	26,99	247,5	31,51
CP2	193	24,57	210,5	26,80	251,5	32,02
CP3	192	24,45	211,5	26,93	233,5	29,73
Média	192,67	24,53	211,33	26,91	244,17	31,09
OBS.: CP1, CP2 e CP3 definem a ordem de ensaio dos cps						

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos valores obtidos da tabela 10, pôde-se gerar um gráfico, apresentando a evolução da resistência à compressão do concreto (figura 53).

Figura 53 – Evolução da resistência à compressão do concreto

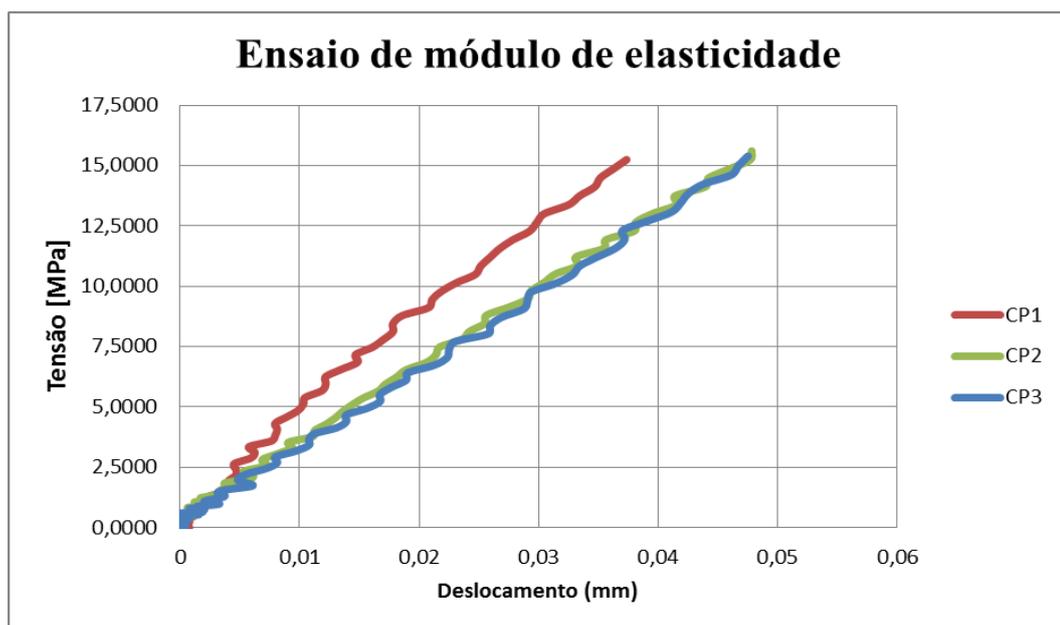


(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Para cada corpo de prova, a cada 0,5 segundo, foi medida a carga aplicada e a deformação causada por esta. A partir destes dados pode-se gerar um gráfico (tensão x deformação) (figura 54), apresentado a seguir, para cada corpo de prova e a partir deles extrair o módulo de elasticidade do concreto utilizado.

Figura 54 – Gráfico tensão x deformação do concreto



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos dados do gráfico, considerando que o deslocamento foi medido para um intervalo de 100 mm da altura do corpo de prova, e utilizando a equação 1, foi possível calcular a deformação e então determinar o módulo de elasticidade para o concreto, conforme a tabela 11.

Tabela 11 – Módulo de elasticidade do concreto

CP	Tensão 0,5 (MPa)	ϵ_a	σ_b (MPa)	ϵ_b	Módulo (GPa)
CP1	0,5	1,09E-05	9,0	2,00E-04	44,92
CP2	0,5	1,25E-05	9,0	2,68E-04	33,32
CP3	0,5	1,56E-05	9,0	2,84E-04	31,66
Média	0,5	1,41E-05	9,0	2,76E-04	32,49
obs.: o valor do módulo de elasticidade do CP1 foi descartado por estar fora da tendência dos resultados da média dos cps					

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS

Para o ensaio de resistência à compressão das argamassas foram moldados nove corpos de prova cilíndricos, com dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo três para cada argamassa utilizada. O ensaio de compressão nas argamassas ocorreu apenas na idade de 28 dias após a produção das mesmas.

As tabelas 12, 13 e 14, a seguir mostram os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão das argamassas.

Tabela 12 – Resistência à compressão da argamassa com adição de sílica ativa

Corpo de prova	Carga (kN)	Tensão (MPa)
CP1	86,5	44,05
CP2	88,6	45,12
CP3	89,2	45,43
Média	88,10	44,87

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 13 – Resistência à compressão da argamassa com metacaulim

Corpo de prova	Carga (kN)	Tensão (MPa)
CP1	76,6	39,01
CP2	78,4	39,93
CP3	75,2	38,30
Média	76,73	39,08

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 14 – Resistência à compressão da argamassa com cinza de casca de arroz

Corpo de prova	Carga (kN)	Tensão (MPa)
CP1	89,4	45,53
CP2	39,8	20,27
CP3	86,5	44,05
Média	87,95	44,79
obs.: valores para CP2 foram descartados		

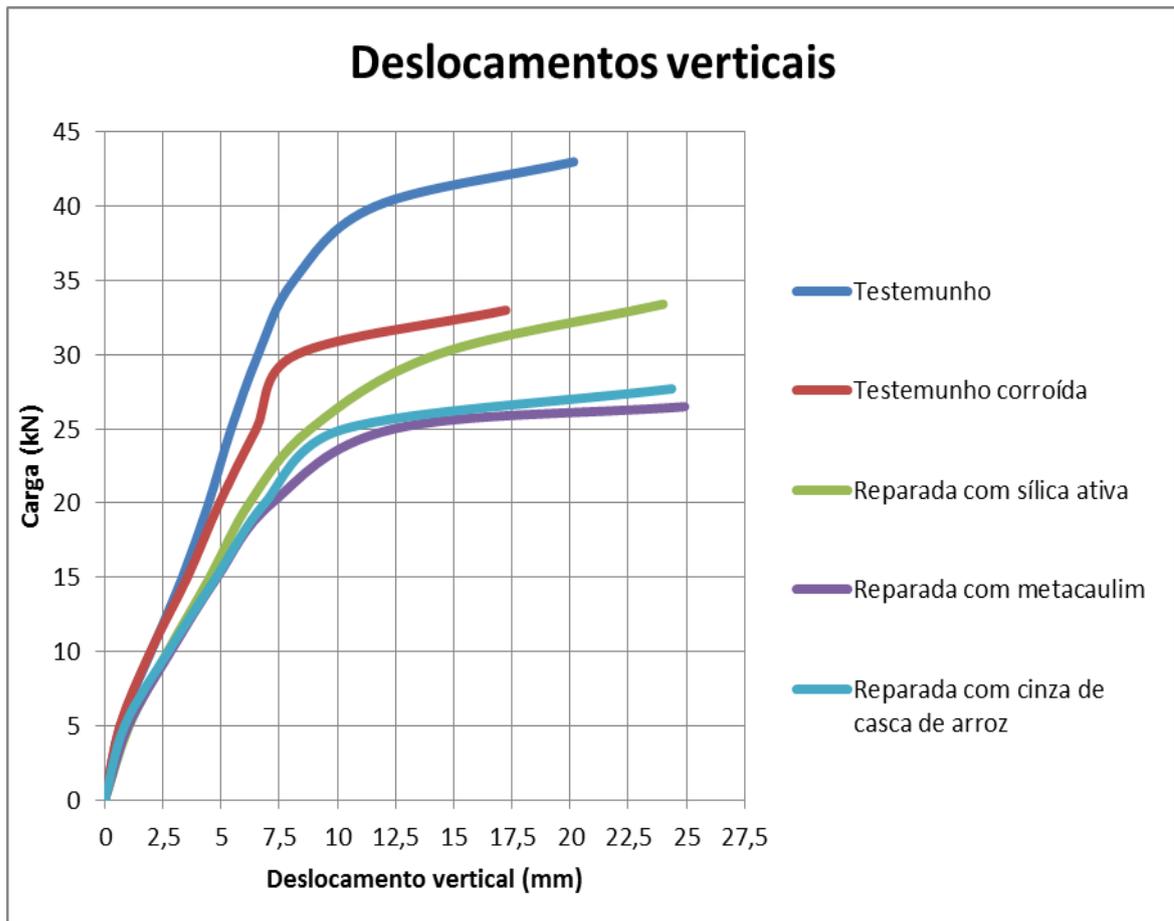
(fonte: elaborado pelo autor)

5.4 ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS

Com o objetivo de determinar qual das vigas recuperadas tem o melhor desempenho tanto em termos de resistência mecânica, quanto em termos de aderência entre o concreto e a argamassa, realizou-se o ensaio de flexão a quatro pontos nas cinco vigas – uma viga testemunho, outra testemunho corroída, outra corroída e recuperada com argamassa com sílica ativa, outra corroída e recuperada com argamassa com metacaulim e por último uma corroída e recuperada com cinza de casca de arroz –. O ensaio foi realizado após a cura das argamassas por 28 dias em câmara úmida.

A partir dos dados gerados pelo ensaio de resistência à flexão foi possível gerar um gráfico (carga x deslocamento vertical) para todas as vigas ensaiadas (figura 55).

Figura 55 – Gráfico carga x deslocamento vertical



(fonte: elaborado pelo autor)

Percebe-se no gráfico acima que a viga testemunho, como esperado, apresentou os melhores resultados, suportando a maior carga e apresentando a segunda menor deformação. A viga testemunho corroída, contrariando ao previsto, apresentou a menor flecha entre todas as vigas. Este fato pode ter ocorrido devido à corrosão provocada nas suas armaduras, podendo ter alterando o comportamento da viga tornando-a frágil. As três vigas recuperadas, de acordo com o gráfico acima, tiveram comportamento semelhante, principalmente em relação às deformações apresentadas, porém em relação à carga de ruptura, a viga recuperada com sílica ativa mostrou-se mais eficiente, em relação a resistência mecânica, que as demais, com carga de ruptura 20% e 17% superior a apresentada pelas vigas com metacaulim e cinza de casca de arroz, respectivamente.

A tabela 15 mostra os resultados globais do ensaio, ou seja, os valores de carga de ruptura e a flecha máxima neste instante. Percebe-se que, como esperado, a carga de ruptura das vigas reparadas foram inferiores à viga testemunho. Isso ocorreu, pois mesmo as vigas reparadas

apresentaram um grau de corrosão de aproximadamente 10% de perda de massa das barras, o que inevitavelmente levou a uma redução de área de seção de aço. Como todas as vigas devem possuir o mesmo grau de corrosão, a redução da carga de ruptura observada para as vigas reparadas com metacaulim e cinza de casca de arroz, em comparação com a viga reparada com sílica ativa, se deve principalmente à uma possível redução de eficiência de aderência entre as argamassas e o concreto original. A redução observada pela a viga com metacaulim também pode ser devido a uma redução da resistência desta argamassa (mesmo que pequena) em comparação com as outras duas argamassas.

Tabela 15 – Carga de ruptura e flecha máxima das vigas após ensaio de flexão

Viga	Carga de ruptura (kN)	flecha máxima (mm)	Tipo de ruptura
Viga testemunho	43,0	20,16	esmagamento do concreto
Viga testemunho corroída	33,0	17,24	esmagamento do concreto
viga com sílica ativa	33,4	24,00	esmagamento do concreto
viga com metacaulim	26,5	24,93	esmagamento do concreto
viga com cinza de casca de arroz	27,7	24,37	esmagamento do concreto

(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 16 apresenta os dados obtidos em termos de eficiência na fase de fissuração das vigas. A eficiência neste caso foi calculada considerando a carga de 20 kN que, de acordo com o gráfico da figura 55, encontra-se na fase de fissuração para todas as vigas. Para esta carga obteve-se a flecha apresentada por cada uma das vigas recuperadas e com estes dados foi possível saber a deformação apresentada para cada kN de carga aplicado. Os resultados mostram que, de acordo este critério, a viga recuperada com sílica ativa é a mais eficiente, apresentando a menor deformação para cada kN aplicado.

Tabela 16 – Eficiência na fase de fissuração das vigas recuperadas

Viga	Carga (kN)	Flecha (mm)	Eficiência (mm/kN)
viga com sílica ativa	20,0	6,21	0,31
viga com metacaulim	20,0	7,18	0,36
viga com cinza de casca de arroz	20,0	6,88	0,34

(fonte: elaborado pelo autor)

Seguindo a mesma tendência que a tabela 16, a tabela 17 mostra a eficiência das vigas em relação ao regime plástico. A eficiência neste caso foi calculada considerando a carga necessária para se obter uma flecha de 15 mm. A partir destes dados calculou-se a deformação apresentada para cada kN aplicado. Os resultados mostram que, de acordo com este critério, a viga recuperada com sílica ativa é a mais eficiente também no regime plástico.

Tabela 17 – Eficiência no regime plástico das vigas recuperadas

Viga	Carga de ruptura (kN)	Flecha (mm)	Eficiência (mm/kN)
viga com sílica ativa	30,5	15,00	0,49
viga com metacaulim	25,5	15,00	0,59
viga com cinza de casca de arroz	26,5	15,00	0,57

(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, a tabela 18 mostra os deslocamentos laterais obtidos entre o concreto e a argamassa nas vigas que foram reparadas. A ideia é que esta medida possa dar um indicativo da qualidade da aderência entre ambas as camadas. Percebe-se que todas as vigas apresentaram deslocamentos muito baixos ou nulos, mostrando que ou a técnica não é adequada para medir um indicativo da aderência, ou que as argamassas possuem uma boa aderência com o substrato. Mais ensaios precisam ser realizados para que seja possível obter informações mais precisas com relação a esta medida.

Entretanto, percebe-se uma tendência de que a argamassa da viga com cinza de casca de arroz tenha se deslocado em comparação com o substrato. Isto está de acordo com os resultados apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Deslocamentos laterais entre o concreto e as argamassas

Carga (kgf)	Deslocamento Lateral (mm)	Carga (kgf)	Deslocamento Lateral (mm)	Carga (kgf)	Deslocamento Lateral (mm)
0	0,00	0	0,00	0	0,00
500	0,00	500	0,01	500	0,00
1000	0,01	1000	0,01	1000	0,00
1500	0,01	1500	0,01	1500	0,01
2000	0,01	2000	0,01	2000	0,02
2500	0,01	2500	0,01	2500	0,03
3000	0,01	2650	0,01	2770	0,05

(fonte: elaborado pelo autor)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi avaliado o desempenho de três tipos de materiais pozolânicos adicionados à argamassa para reparo de vigas submetidas à corrosão de armadura, tanto no quesito de resistência mecânica como no de aderência da argamassa de reparo ao substrato de concreto. Para tanto, foram realizados ensaios de resistência à flexão e comparados os resultados obtidos.

Os resultados obtidos deste trabalho, mesmo considerando todas as limitações impostas, não devem ser julgados como verdadeiros para todos os casos. Cada argamassa foi utilizada em apenas uma viga, sendo uma amostra pouco significativa. O trabalho aqui apresentado utilizou apenas um traço tanto para o concreto, como para as argamassas e o experimento se desenvolveu por um curto período de tempo, não sendo possível avaliar o comportamento das argamassas com adições pozolânicas em diferentes idades. Além disso, uma única resistência característica do concreto foi utilizada no estudo, não sendo possível determinar o comportamento das argamassas aplicadas em concreto com maior ou menor resistência características.

6.1 CONCLUSÕES

No que diz respeito à resistência à compressão do concreto aos 28 dias, o valor obtido foi o esperado para o traço especificado, assim como os resultados proveniente deste mesmo ensaio para as argamassas, tendo seus valores em torno 40 MPa.

Quanto ao método utilizado para acelerar a corrosão das armaduras nas vigas, o CAIM se mostrou bastante eficaz, provocando a corrosão desejada em todas as vigas submetidas ao ensaio em um curto período de tempo.

A partir dos resultados obtidos do ensaio resistência à flexão são realizadas algumas análises. Os resultados apresentado para o deslocamento lateral entre a argamassa e o concreto foi extremamente pequeno em todas as vigas, da ordem de 0,01 mm. Porém, este deslocamento na viga reparada com cinza de casca de arroz, apesar de ser muito pequeno, quando comparado ao apresentado pelas demais vigas recuperadas pode ser um indicativo de perda de

aderência, pois houve um deslocamento cinco vezes maior do que aquele apresentado nas vigas reparadas com sílica ativa e metacaulim. Desta forma, pode-se, concluir que esta argamassa foi a que parece ter apresentado a menor aderência com o substrato concreto.

Quanto ao deslocamento vertical apresentado pelas vigas até a ruptura, a viga testemunho corroída, apresentou um valor de flecha inferior até mesmo ao apresentado pela viga testemunho. Uma possível explicação para o ocorrido é que devido à corrosão das armaduras da viga testemunho corroída, esta teve seu comportamento, quando em carga, alterado, comportando-se de maneira frágil, ao invés de comportamento dúctil desejado para estes elementos. Nos demais casos, as vigas, apesar de corroídas, apresentaram o comportamento dúctil esperado, apresentando uma maior flecha antes da ruptura do elemento.

No que diz respeito às cargas necessárias para romper os elementos, como já era esperado a viga testemunho apresentou carga de ruptura muito superior as demais vigas. Quanto às vigas recuperadas, a viga com sílica ativa apresentou comportamento mecânico superior ao apresentado pelas vigas com metacaulim e cinza de casca de arroz, apesar de as três argamassas apresentarem, praticamente, a mesma resistência à compressão. Uma possível explicação para o fato é que a sílica ativa possui uma menor granulometria se comparada às outras duas adições, favorecendo a obtenção de uma matriz mais densa do que as das demais vigas. Além disso, o traço especificado para as três argamassas foi baseado no traço usualmente especificado para recuperação de estruturas com argamassa com sílica ativa.

Quando comparada a eficiência mecânica das vigas, utilizando para isso o deslocamento vertical apresentado para cada quilo-Newton aplicado, a viga recuperada com sílica ativa mostrou-se mais eficiente tanto na fase de fissuração, como no regime plástico, demonstrando possuir maior rigidez que as demais.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os trabalhos futuros, pode-se sugerir a realização de ensaios para medir a resistência da aderência entre o concreto e argamassa, podendo esta resistência ser verificada através de ensaios de arracamento das argamassas.

Outra sugestão é a realização de ensaios tanto das resistências à compressão das argamassas, quanto de flexão em diferentes idades, verificando assim, o comportamento destas com o passar do tempo. Além disso, pode-se promover nova corrosão acelerada, após a recuperação das vigas, verificando desta forma, o desempenho das argamassas quando submetidas à corrosão.

Pode-se também promover ensaios de corrosão por carbonatação acelerada do concreto, podendo-se comparar os efeitos provocados pela corrosão por carbonatação com os efeitos causados pela corrosão por cloretos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. del C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1992. 104 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto - ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 15894**: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 13956**: sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará**: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. 1998. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- DAL MOLIN, D. C. C.; OLIVEIRA, A. P. M.; KULAKOWSKI, M. P. Estudo de concreto com adição de sílica ativa (microsílica) frente ao ataque de agentes agressivos para emprego em pisos especiais. In: INTERNACIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1., 1996, Florianópolis. **Proceedings**... Florianópolis: UFSC, 1996. p. 590-598. Disponível em: <<http://infohab.unochapeco.edu.br/acervos/buscaautor/codigoAutor/105/page/2>>. Acesso em: 18 set. 2014
- 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.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345 p.
- HELENE, P. R. do L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1986. 46 p.
- _____. **Contribuição ao estudo da corrosão em estruturas de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MENDES, E. da S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2002. 146 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

NITA, C.; JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. São Paulo: EPUSP, 2007. Boletim Técnico PCC n. 451.

PEDROZO, E. C. **Estudo da utilização de cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 288f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998. 250 p.

TORRES, A. da S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.