



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado
com adição de materiais pozolânicos submetidas à corrosão
acelerada**

Júlia Giordani Berton

Lajeado, junho de 2019.

Júlia Giordani Berton

Avaliação do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de materiais pozolânicos submetidas à corrosão acelerada

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como exigência para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a M.^a Débora Pedroso Righi

Lajeado, junho de 2019.

DEDICATÓRIA

À toda a minha família, especialmente aos meus pais Cleomenes e Marinilce, que nunca mediram esforços para que este sonho se realizasse.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Cleomenes e Marinilce, por todo o suporte, apoio, auxílio, compreensão, incentivo e por permitirem a realização deste sonho. Agradeço também meu namorado Rafael pela cumplicidade, apoio e ajuda em todos os momentos de realização deste trabalho. A toda a minha família, por todo o apoio e pela compreensão nos momentos difíceis e de ausência.

Agradeço minha orientadora Emanuele Gauer, por todo o auxílio durante a realização da primeira etapa deste trabalho.

À minha orientadora Débora Pedroso Righi, pela confiança e apoio durante a realização de todo este trabalho. Agradeço o carinho e incentivo durante toda esta jornada e pela amizade que conquistamos. Sou grata ter sido sua orientanda, você é um exemplo de sabedoria, resiliência e comprometimento. Me sinto honrada em dizer que você foi minha orientadora. Muito obrigada por tudo!

À toda a equipe da RIMAPI Escritório de Engenharia pela oportunidade de iniciar uma vida profissional, por todo o apoio e auxílio e por permitirem minha ausência em alguns momentos durante esta jornada.

Agradeço minha amiga e colega Mariel, por todo o apoio e auxílio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho e por compartilhar comigo estes anos de graduação.

À toda a equipe do Laboratório de Tecnologia da Construção da UNIVATES – LATEC, por estarem sempre dispostos a ajudar e por todo auxílio durante a realização dos ensaios.

RESUMO

A vida útil das estruturas de concreto armado sem manutenção e correções, tem sido menor do que a projetada, o que se deve ao grande aumento de manifestações patológicas nas construções. A falta de durabilidade está associada diretamente às manifestações patológicas. A corrosão das armaduras destaca-se por ser a manifestação que mais causa problemas às estruturas de concreto armado, devido ao seu elevado potencial de dano. Desta forma, este trabalho estuda a durabilidade de três tipos de vigas em concreto armado submetidas à corrosão acelerada pelo método de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM), que utiliza uma solução de cloreto de sódio aliada à aplicação de diferença de potencial, de modo que se simule o ambiente marinho e induza-se a corrosão durante 30 dias. Foram moldadas seis vigas, sendo duas referências, duas com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz na porcentagem de 10 (volume) e duas com substituição parcial do cimento por sílica ativa na porcentagem de 10% (volume). Três destas vigas, uma de cada um dos traços, foram submetidas ao método CAIM. As vigas têm dimensões de 100 x 10 x 15 cm e armadura de flexão simples por 2 barras de 8 mm. A resistência das vigas foi observada por meio de ensaio tração na flexão, comparando-se a resistência entre as vigas submetidas e as não submetidas ao processo de corrosão. A viga referência submetida ao processo de corrosão apresentou uma redução de resistência na ordem de 46,35%, ao comparada com a viga referência mantida em condições ambiente, enquanto a viga com sílica ativa teve uma redução de suporte de 24,43%, já a viga com cinza de casca de arroz apresentou uma redução de resistência de 3,30%. Desta forma, os resultados demonstram que a adição de materiais pozolânicos, especialmente a cinza de casca de arroz diminui o potencial de corrosão em vigas de concreto armado.

Palavras-chave: Concreto. Corrosão. Adições. CAIM.

ABSTRACT

The useful life of the reinforced concrete structures, without maintenance and corrections, has been smaller than the life projected, this is due to the great increase of pathological manifestations in the constructions. Lack of durability is directly associated with pathological manifestations. The corrosion of the reinforcement stands out because it is the manifestation that causes more problems to the structures of reinforced concrete, due to its high potential of damage. In this way, this work studies the durability of three types of reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion by the CAIM method. In order to accelerate corrosion, the Modified Immersion Accelerated Corrosion (CAIM) method was used, using a solution of sodium chloride combined with the application of difference of potential, in order to simulate the marine environment and induce corrosion for 30 days. Six beams were molded with two references, two with partial replacement of the cement by rice husk ash in the percentage of 10% (volume) and two with partial replacement of the cement with active silica in the percentage of 10% (volume), being three of these beams, one of each trace submitted to the CAIM method. The beams have dimensions of 100 x 10 x 15cm and simple bending armor for 2 8mm bars. The strength of the beams was observed by means of a four point bending test, comparing the resistance between the submitted beams and those not submitted to the corrosion process. The reference beam subjected to the corrosion process showed a resistance reduction in the order of 46,35%, as compared to the reference beam maintained at ambient conditions, while the active silica beam had a support reduction of 24,43%, the beam with rice husk ash showed a reduction of resistance of 3,30%. In this way, the results demonstrate that the addition of pozzolanic materials, especially the rice husk ash, reduces the potential for corrosion in reinforced concrete beams.

Keywords: Concrete. Corrosion. Additions. CAIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do projeto das estruturas de concreto	30
Figura 2 - Mecanismo de corrosão de estruturas de concreto armado	38
Figura 3 - Célula de corrosão em concreto armado	40
Figura 4 - Realização do ensaio CAIM - vista da fonte e dos corpos de prova	44
Figura 5 - Fluxograma dos ensaios	46
Figura 6 - Peneiramento do agregado miúdo	48
Figura 7 - Procedimentos para determinação da massa específica da areia	49
Figura 8 - Procedimento para determinação da massa unitária da areia	50
Figura 9 - Peneiramento do agregado graúdo	51
Figura 10 - Procedimento para determinação da massa específica da brita	52
Figura 11 - Procedimento para determinação da massa unitária da brita	53
Figura 12 - Ábaco de Abrans CP V - ARI	54
Figura 13 - Materiais utilizados separados conforme determinado pelo traço	57
Figura 14 - Detalhamento das armaduras	58
Figura 15 - Fôrmas de MDF utilizadas	59
Figura 16 - Estribo finalizado	59
Figura 17 - Posicionamento dos fios de cobre sobre as armaduras positivas	60
Figura 18 - Armaduras finalizadas	61
Figura 19 - Espaçadores plásticos posicionados nas vigas	61
Figura 20 - Aparelho utilizado no ensaio de abatimento	62
Figura 21 - Realização do ensaio de abatimento	63
Figura 22 - Adensamento do concreto com auxílio de vibrador elétrico	63
Figura 23 - Vigas moldadas finalizadas e prontos para cura	64

Figura 24 - Corpos de prova moldados	65
Figura 25 - Corpos de prova na câmara úmida	65
Figura 26 - Vigas na cura úmida	66
Figura 27 - Realização do ensaio de compressão	66
Figura 28 - Esquema de ligação das vigas a fonte.....	68
Figura 29 - Propagação da corrosão nas vigas.....	68
Figura 30 - Ensaio de tração na flexão.....	69
Figura 31 - Esquema ensaio de resistência a tração na flexão para as vigas moldadas.....	70
Figura 32 - Mapeamento e análise de fissuração.....	71
Figura 33 - Armadura corroída	72
Figura 34 - Diâmetro das barras pós corrosão	72
Figura 35 - Fissuração viga REFNC.....	81
Figura 36 - Fissuração viga REFC	81
Figura 37 – Fissuração viga 10CCANC	82
Figura 38 - Fissuração viga 10CCAC	82
Figura 39 - Fissuração viga 10SANC	83
Figura 40 - Fissuração viga 10SAC.....	83
Figura 41 - Mapeamento de fissuração vigas referência.....	84
Figura 42- Mapeamento fissuração viga com adição de cinza de casca de arroz	84
Figura 43 - Mapeamento fissuração viga com adição de sílica ativa	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupos granulométricos do agregado graúdo	25
Tabela 2 - Módulo de finura dos agregados miúdos	25
Tabela 3 - Requisitos químicos e físicos dos materiais pozolânicos	28
Tabela 4 -Classe de agressividade do meio e qualidade do concreto	33
Tabela 5 - Cobrimento mínimo para estruturas de concreto armado	34
Tabela 6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	48
Tabela 7 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	51
Tabela 8 - Consumo de água aproximado (Ca)	55
Tabela 9 - Consumo de agregado graúdo.....	55
Tabela 10 - Quantidade de material por traço	57
Tabela 11 - Resistência à tração na flexão	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes e siglas dos Cimentos Portland	24
Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental	33
Quadro 3 - Causas, mecanismos e sintomas da deterioração em estruturas de concreto	36
Quadro 4 - Nomenclatura adotada para as vigas.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	49
Gráfico 2 – Curva granulométrica agregado graúdo	52
Gráfico 3 - Resistência à compressão simples dos corpos de prova de concreto.....	73
Gráfico 4 - Resistência à tração na flexão - vigas não expostas à corrosão	74
Gráfico 5 - Resistência à tração na flexão - vigas expostas à corrosão	75
Gráfico 6 - Resistência à tração na flexão - vigas referência	77

Gráfico 7 - Resistencia à tração na flexão - vigas com cinza de casca de arroz.....	78
Gráfico 8 - Resistência à tração na flexão - vigas com sílica ativa.....	79
Gráfico 9 – Flecha máxima.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	<i>American Concrete Institute</i> – Instituto Americano de Concreto
a/c	Relação água-cimento
°C	Unidade de temperatura em grau Celcius
CAIM	Corrosão Acelerada por Imersão Modificada
CCA	Cinza de casca de arroz
CAD	Concreto de alto desempenho
cm ³	Unidade de volume em centímetros cúbicos
cm	Unidade de medida em centímetros
CO ₂	Dióxido de carbono – elemento químico
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CP	Cimento Portland
CP V ARI	Cimento Portland classe cinco de alta resistência inicial
C ₃ S	Silicato tricálcico – elemento químico
cp	Corpo de prova
d.d.p	Diferença de potencial
FIB	Federação Internacional de Estruturas de Concreto
g	Unidade de medida em gramas
g/l	Unidade de medida em gramas por litro
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto

ISO	<i>International Organization for Standardization</i> - Organização Internacional de Normatização
K	Potássio – elemento químico
Km	Unidade de medida em quilômetros
LATEC	Laboratório de Tecnologias da Construção – UNIVATES
LEME	Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – UFRGS
mA	Unidade de medida em miliampere
mm	Unidade de medida em milímetros
MPa	Unidade de tensão/pressão em Mega Pascals
NaCl	Cloreto de sódio – elemento químico
NO ₂	Dióxido de nitrogênio – elemento químico
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma do Mercosul
O ₂	Oxigênio – elemento químico
pH	Escala numérica utilizada para especificar acidez e basicidade de soluções aquosas
REFC	Viga referência corroída
REFNC	Viga referência não corroída
RS	Rio Grande do Sul
SiO ₂	Dióxido de silício (sílica) – elemento químico
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
V	Unidade de tensão elétrica – Volt
µm	Unidade de medida em micrômetros
%	Medida de razão – porcentagem
10CAC	Viga com 10% de cinza de casca de arroz corroída
10CANC	Viga com 10% de cinza de casca de arroz não corroída
10SAC	Viga com 10% de sílica ativa corroída
10SANC	Viga com 10% de sílica ativa não corroída

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Relevância e justificativa da pesquisa	17
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 Delimitação da pesquisa.....	21
1.4 Estrutura do trabalho	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Concreto.....	23
2.1.1 Cimento Portland	23
2.1.2 Agregado graúdo	24
2.1.3 Agregado miúdo.....	25
2.1.4 Água	26
2.1.5 Adições	26
2.1.5.1 Materiais pozolânicos	26
2.1.5.1.1 Sílica ativa.....	28
2.1.5.1.2 Cinza de casca de arroz.....	29
2.2 Durabilidade e vida útil das estruturas.....	29
2.3 Degradação de estruturas	34
2.3.1 Causas químicas	37
2.3.2 Causas eletroquímicas	37
2.3.2.1 Corrosão das armaduras	38
2.3.2.1.1 Corrosão química.....	39
2.3.2.1.2 Corrosão aquosa ou corrosão eletroquímica	39
2.3.2.2 Corrosão induzida por cloretos	41
2.4 Método CAIM - corrosão por imersão modificada.....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Programa experimental.....	45
3.2 Materiais.....	46
3.2.1 Cimento.....	46
3.2.2 Água de amassamento	47

3.2.3 Agregado miúdo.....	47
3.2.3.1 Determinação da granulometria.....	47
3.2.3.2 Massa específica e massa unitária	49
3.2.4 Agregado graúdo	50
3.2.4.1 Determinação granulométrica.....	50
3.2.4.2 Determinação na massa específica e massa unitária	52
3.2.5 Cinza de casca de arroz.....	53
3.2.6 Sílica ativa.....	53
3.3 Dosagem	54
3.4 Armaduras	57
3.5 Execução dos elementos.....	58
3.5.1 Fôrmas	58
3.5.2 Armadura	59
3.5.3 Moldagem dos elementos de concreto	62
3.5.4 Cura	65
3.5.5 Resistência à compressão simples	66
3.5.6 Corrosão acelerada por imersão modificada - CAIM	67
3.5.7 Ensaio de resistência à tração na flexão.....	69
3.5.8 Análise da fissuração.....	71
3.5.9 Determinação da perda de massa	71
 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	 73
4.1 Resistência à compressão simples	73
4.2 Resistência à tração na flexão	74
4.3 Análise de fissuração.....	80
4.4 Perda de massa	85
 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	 86
 REFERÊNCIAS.....	 88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e justificativa da pesquisa

As manifestações patológicas correspondem à parte da medicina que trata as origens, sintomas e as causas das doenças. De mesma forma, na engenharia civil, esta área estuda as causas das “lesões” nas estruturas, que por sua vez causam a degradação e a redução da vida útil das estruturas. A compreensão sobre os materiais que compõe a estrutura, tipo de utilização da mesma e o ambiente a qual será exposta, permitem a realização do melhor dimensionamento e planejamento das edificações, reduzindo assim os principais agentes que a deterioram.

Segundo Moreno e Roque (2005), atualmente os materiais utilizados na construção civil não são intrinsecamente duráveis, devido à variação das propriedades em consequência da relação da estrutura com o ambiente no qual se encontra exposta, interferindo tanto na vida útil quando na durabilidade das mesmas. Conforme John (2001), os estudos acerca da influência das propriedades dos materiais e da durabilidade das estruturas ganharam força com o desenvolvimento sustentável, ganhando novas dimensões na construção civil. A deterioração é antônima de durabilidade, sendo desencadeada por diversos fatores ligados ao meio em que se encontra ao projeto, as manifestações patológicas, a questões ligadas ao mau uso, dentre outros.

As Normas Brasileiras Regulamentadoras - NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelecem os requisitos mínimos de desempenho, projeto, vida útil e durabilidade para as estruturas de concreto armado, apresentando ainda as

diretrizes para a elaboração de projetos que melhor adequem-se às situações nas quais a estrutura será exposta.

Após a identificação da patologia presente na estrutura é necessário compreender os mecanismos que deterioram a mesma, possibilitando promover o diagnóstico da estrutura e avaliar a gravidade do problema, por meio da investigação das suas causas e origens. Realizado o prognóstico da mesma, determina-se a evolução do problema e as suas consequências e são tomadas as decisões quanto às técnicas e aos materiais que serão utilizados no reparo da estrutura, avaliando também a viabilidade econômica e estrutural da realização dos reparos. Terminada essa fase, inicia-se a etapa de terapia da estrutura, na qual realiza-se a recuperação do elemento deteriorado (HELENE, 1993).

Conforme Helene (2003), as pesquisas relacionadas com a durabilidade das estruturas de concreto como um todo (concreto armado e concreto pré-moldado) têm prosperado devido a maior compreensão dos mecanismos de transporte de gases e líquidos agressivos nos meios porosos de materiais, tornando viável a avaliação do período de tempo em que a estrutura mantém as suas condições de desempenho satisfatórias, atendendo as finalidades esperadas no projeto. Esta avaliação é conhecida como vida útil da estrutura.

Cabrera (2014), apresenta em seu trabalho que a durabilidade das estruturas depende diretamente dos seguintes fatores: classe de agressividade do meio conforme a região de construção da edificação, da relação água/cimento e das características dos materiais empregados (agregados, adições, aditivos e qualidade do aço). Dentre os fatores citados a relação a/c é o fator que exerce a maior influência na durabilidade da estrutura, por controlar características como permeabilidade, porosidade, capilaridade, densidade e compacidade além da resistência mecânica.

Conforme Medeiros, Andrade e Helene (2011), cerca de 3% do Produto Interno Bruto (PIB) do país são gastos com a recuperação dos prejuízos decorrentes da corrosão das armaduras de concreto armado. Aplicando-se a estimativa ao caso brasileiro, chega-se ao valor de cerca de 20 bilhões de dólares por ano gastos apenas com este tipo de patologia. Conforme Graeff (2007), estes custos podem ser diretos, como a substituição dos materiais ou componentes da estrutura, ou indiretos, como

os devidos a paralisações acidentais, superdimensionamento de projeto e perda de eficiência.

Desta forma, diversos autores como Torres (2006), Graeff (2007) e Helene (1986), desenvolvem estudos sobre os processos envolvidos na corrosão das armaduras e o grau de despassivação (perda da película protetora do aço) da armadura. Tuutti (1982) apresenta em seus estudos a curva de evolução da corrosão, que corresponde à curva de perda de desempenho da estrutura afetada sendo dividida em duas fases, as que visam a moldagem de materiais para áreas em que os processos corrosivos são acelerados - como a NBR 6118 (ABNT, 2014) que propõe diferentes tipos de cimento Portland e espessuras de cobrimento para as classes de agressividade do meio - e os que simulam a penetração dos cloretos e o avanço das frentes de carbonatação nos elementos de concreto armado.

Torres (2006) define o método CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada), como uma metodologia de ensaio que apresenta elevado potencial de utilização para a avaliação da degradação gerada pela corrosão na estrutura, sendo também eficiente para a obtenção de dados comparativos acerca do desempenho de diferentes concretos.

Uma das mais graves e frequentes manifestações patológicas que ocorrem em estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras, que podem ser causadas por erros de projeto, falhas durante a execução, falta de manutenção periódica ou por exposição da estrutura a ambientes agressivos para o qual não foram projetadas. As fissuras causadas pela corrosão das armaduras no concreto são relacionadas ao aumento de volume do concreto exposto ao agente corrosivo, apresentando também manchas na estrutura como um todo (CABRERA, 2014). Assim, o pleno conhecimento do meio no qual a estrutura será inserida e suas condições de uso, bem como a realização de manutenções e vistorias periódicas, podem evitar posteriores problemas patológicos nas edificações, que em casos graves podem afetar diretamente a segurança e o bem estar dos usuários da mesma.

Os estudos relacionados ao aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado, vem cada vez mais ganhando destaque. Neste sentido, estudos realizados apontam que o uso de materiais pozolânicos acrescidos na matriz

cimentícia de concretos de cimento Portland, pode proporcionar vantagens como redução do calor de hidratação, melhor resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, diminuição nos poros da pasta hidratada e um aumento na durabilidade das estruturas (GUEDERT apud CABRERA, 2014). Conforme Tashima (2006), atualmente os materiais pozolânicos vem sendo utilizados na produção de concretos de alto desempenho (CAD) e concretos auto-adensáveis, além de ser muito utilizado como forma de inibição de reações expansivas.

Deste modo, este trabalho visa avaliar o comportamento de vigas de concreto armado com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada, em laboratório, com armaduras submetidas à perda de 10% da massa inicial, devido à corrosão por solução agressiva à estrutura, com diferentes composições de concreto.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho dividem-se em objetivos gerais e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência mecânica, através do ensaio de tração na flexão, da adição de minerais (cinza de casca de arroz e sílica ativa) na matriz cimentícia de três vigas em concreto armado, submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada, método CAIM.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos consistem em um conjunto de etapas a serem realizadas e questões a serem verificadas, buscando possibilitar o pleno alcance do objetivo geral deste trabalho. Desta forma, definem-se em:

- a) avaliar as características físicas dos materiais a serem utilizados no concreto;
- b) avaliar o efeito da utilização de materiais pozolânicos (10% em volume) em termos de resistência mecânica nos concretos;
- c) avaliar a incorporação de materiais pozolânicos como cinza de casca de arroz e sílica ativa em vigas de concreto armado quando submetidas a corrosão;
- d) comparar a resistência mecânica entre vigas de concreto armado submetidas e não submetidas ao ensaio de corrosão acelerada;
- e) avaliar a fissuração e a perda de massa das barras da armadura positiva.

1.3 Delimitação da pesquisa

O trabalho delimita-se na comparação da resistência mecânica entre três vigas de concreto armado com substituição parcial do cimento CP V- ARI (10% em volume) por sílica ativa e cinza de casca de arroz, submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada durante trinta dias, e três vigas com a mesma composição das anteriormente citadas não submetidas a nenhum processo de degradação.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho se estrutura inicialmente em 5 capítulos, introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados iniciais e cronograma da pesquisa, onde serão abordados os temas pertinentes ao assunto. Serão apresentadas ainda as referências utilizadas para o embasamento da pesquisa.

- a) capítulo 1 – Introdução: contém as considerações iniciais sobre o tema a ser desenvolvido por meio de pesquisa científica. No capítulo são apresentados os objetivos, justificativas e delimitações do tema;

- b) capítulo 2 – Revisão bibliográfica: contempla os conhecimentos teóricos necessários para a compreensão do estudo proposto;
- c) capítulo 3 – Materiais e métodos: são apresentados os ensaios e procedimentos experimentais desenvolvidos em laboratório, para a caracterização dos materiais utilizados no concreto, tanto quanto do próprio concreto;
- d) capítulo 4 – Resultados: contém os resultados pertinentes a pesquisa;
- e) capítulo 5 – Conclusões e considerações finais: apresenta o fechamento da pesquisa, com considerações pertinentes da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos ligados à patologia das estruturas de concreto armado. Serão abordados conceitos acerca das estruturas de concreto armado como: durabilidade, desempenho e vida útil, além dos principais mecanismos que desencadeiam processos de degradação das estruturas.

2.1 Concreto

O concreto, produto mais utilizado na construção civil, é resultante da mistura de materiais inertes (agregados graúdos e miúdos) em um meio aglomerante – pasta resultante da mistura entre água e cimento Portland (CP), permitindo ainda aditivos e adições. Em seu estado fresco, deve apresentar trabalhabilidade suficiente para que possa ser manuseado sem perda da coesão entre as partículas. No seu estado endurecido deve apresentar durabilidade e resistência adequadas para a sua utilização na estrutura das edificações (AMBROZEWICZ, 2012).

2.1.1 Cimento Portland

O aglomerante hidráulico mais utilizado para a produção de concreto é o cimento Portland, sendo oriundo da moagem de clínquer, composto basicamente por silicatos e aluminatos de cálcio. Após a moagem, resulta em um pó fino (clínquer e gesso) que em contato com a água, realiza um processo de hidratação formando uma pasta, que resulta no endurecimento da mistura (PETRUCCI, 1998).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), dadas as exigências estruturais, o cimento em seu estado puro não atende as necessidades da indústria do concreto. Deste modo, foram desenvolvidos cimentos com alterações na sua composição ou com adições minerais. A NBR 16697 (ABNT, 2018), estabelece os 10 tipos de cimento comercializados no Brasil, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Classes e siglas dos Cimentos Portland

Designação normativa (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40
	Com adição	CP I - S	
Cimento Portland composto	Com escoria graduada de alto forno	CP II - E	
	Com material carbonático	CP II - F	
	Com material pozolânico	CP II - Z	
Cimento Portland de alto forno		CP III	
Cimento Portland pozolânico		CP IV	
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40
	Não estrutural	CPB	

Fonte: Adaptado pela Autora com base na NBR 16697 (ABNT, 2018, p.4).

2.1.2 Agregado graúdo

A NBR NM 7211 (ABNT, 2009) define o agregado graúdo como os materiais passantes pela abertura de malha 75 mm e são retidos na abertura de malha de 4,75 mm, no ensaio de granulometria definido pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Como agregado graúdo, utiliza-se para concreto os materiais de origem natural, submetidos à britagem e trituração para conformá-los de acordo com as exigências do mercado. As pedras britadas são divididas comercialmente em 5 grupos (TABELA 1), sendo que as de comum utilização para o amassamento de concretos são as do grupo 1 ou 2. Além dos 5 grupos especificados, o pó de brita (subproduto da britagem de rochas), que apresenta diâmetro de grão inferior ao da brita, também é utilizado na produção dos concretos convencionais, por reduzir a porosidade do concreto (AMBROZEWICZ, 2012).

Tabela 1 - Grupos granulométricos do agregado graúdo

Denominação	Diâmetro
Brita 0	4,8 mm a 9,5 mm
Brita 1	9,5 mm a 19 mm
Brita 2	19 mm a 25 mm
Brita 3	25 mm a 38 mm
Brita 4	38 mm a 75 mm

Fonte: Adaptado pela Autora com base em Ambrozewicz (2012).

2.1.3 Agregado miúdo

Conforme com a NBR NM 7211 (ABNT, 2009), o agregado miúdo é aquele que passa pela peneira com a abertura de 4,75 mm e é retido pela peneira de malha 150 μ m.

O material mais utilizado como agregado para concretos é a areia, que apresenta composição quartzosa em combinação com outros minerais. Conforme NBR NM 7211 (ABNT, 2009), o material é dividido conforme sua faixa granulométrica, podendo ser muito fina, fina, média e grossa, tendo módulo de finura apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Módulo de finura dos agregados miúdos

Denominação	Faixa	Módulo de finura
Muito fina	Faixa 1	de 1,35 a 2,25
Fina	Faixa 2	de 1,71 a 2,85
Média	Faixa 3	de 2,11 a 3,38
Grossa	Faixa 4	de 2,71 a 4,02

Fonte: Ambrozewicz (2012).

O módulo de finura dos agregados relaciona-se com a área de molhagem dos grãos (área superficial), que exerce influência direta na consistência do concreto. Segundo a NBR NM 7211 (ABNT, 2009), este módulo é adquirido pelo somatório das massas de agregado retidas acumuladas nas peneiras de série normal, divididas por 100.

2.1.4 Água

Um dos principais componentes para a composição de concretos e argamassas é a água, que influencia diretamente na segurança e qualidade da obra. Para que não sejam prejudicados os processos de hidratação do cimento, esta deve atender os requisitos mínimos de qualidade e parâmetros químicos e físicos apresentados pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009), que regulamenta a água utilizada no amassamento do concreto.

2.1.5 Adições

Conforme Albuquerque e Lima (2014), as adições minerais são de origem inorgânica e possuem uma granulometria fina. Ao serem incorporadas ao concreto, as referidas adições atuam buscando melhorias químicas e físicas à mistura. Estes materiais inorgânicos são compostos sílico-cálcico-aluminosos, onde os mais utilizados são as pozolanas, que ao reagirem com as reações de hidratação possuem propriedades cimentícias e pozolânicas. Atualmente diversos subprodutos e resíduos da indústria vêm sendo utilizados como adição, como a cinza de casca de arroz e a escória de alto forno (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme Dal Molin (1988), os materiais pozolânicos utilizados no concreto, não possuem propriedades aglomerantes, porém têm a capacidade de formar compostos de hidratação em combinação com hidróxido de cálcio quando finamente moídos e em presença de água. A NBR 12653 (ABNT, 2014) desdobra os materiais pozolânicos conforme a sua origem e propriedades físico-químicas.

2.1.5.1 Materiais pozolânicos

O cimento Portland, material mais utilizado na construção civil não apresenta bons resultados em aspectos de durabilidade, desta forma as pozolanas utilizadas em conjunto com o material, tendem a suprir esta necessidade. Pozolanas adicionadas ao cimento conferem aos concretos e argamassas características como: a diminuição do calor de hidratação, devido às reações exotérmicas e reações atérmicas; a melhor

resistência ao ataque ácido, proveniente da estabilização do hidróxido de cálcio gerado na hidratação do clínquer; o aumento na durabilidade, contribuindo para o bloqueio da reação álcali-agregado e a redução do diâmetro dos poros da pasta hidratada, proporcionando a redução do ataque ao concreto por materiais externos (GUEDERT, 1989).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define como materiais pozolânicos os materiais silicosos ou silicoaluminosos, com pouca ou nenhuma propriedade ligante, que quando finamente separados e na presença de água, apresentam a propriedade ligante devido à reação com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente.

Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos são divididos nos seguintes grupos, conforme a sua natureza:

- a) pozolanas artificiais: decorrem de tratamento térmico ou processos industriais com atividade pozolânica;
- b) pozolanas naturais: tem origem vulcânica ou sedimentar com atividade pozolânica, contendo características petrográficas ácidas com teor de sílica superior a 65%.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) ainda divide as pozolanas em classes conforme a sua composição química e física:

- a) classe C: materiais como cinza volante, proveniente da queima de carvão mineral em usinas termoeletricas;
- b) classe E: qualquer material que não se encaixe nas classificações anteriores;
- c) classe N: pozolanas naturais ou artificiais.

Para a utilização de materiais pozolânicos, os mesmos devem encontrar-se em concordância com a NBR 12653 (ABNT, 2014), que estabelece os requisitos químicos e físicos para o material. Estas especificações podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Requisitos químicos e físicos dos materiais pozolânicos

Propriedades		Classe do material pozolânico		
		N	C	E
Químicos	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
	SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
	Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
	Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	6%
	Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$
Físicos	Material retido na peneira 45 μm	$< 20\%$	$< 20\%$	$< 20\%$
	Índice de desempenho como cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$
	Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$

Fonte: Adaptado pela Autora com base na NBR 12653 (ABNT 2014, p.3 e 4).

Tashima (2006) afirma que os materiais pozolânicos podem ser utilizados tanto como substituto do clínquer, na produção do cimento, como em concretos e argamassas.

2.1.5.1.1 Sílica ativa

A sílica ativa é descrita pela NBR 13956 (ABNT, 2012) como um material que resulta do processo de produção de silício metálico ou ligas de ferrosilício 75% em fornos elétricos, onde o gás gerado durante o processo, oxida-se ao sair do forno estabelecendo partículas de SiO_2 (sílica), que são captadas pelos sistemas coletores.

Quando adicionada a argamassas e concretos, suas propriedades físicas e químicas são observadas. O efeito físico é dado devido à extrema finura das suas partículas esféricas, na ordem de 100 vezes menores que as do cimento, atuando como um microfíler, preenchendo os vazios deixados durante o processo de hidratação do cimento, proporcionando maior densificação e diminuição da capilaridade da pasta de cimento. Os efeitos químicos da sílica ativa são dados pelo elevado teor de sílica na forma amorfa, gerando índices de atividade pozolânica de cerca de 210% em conjunto com o cimento Portland. As ações conjuntas dos efeitos químicos e físicos da sílica resultam em mudanças nas propriedades macroscópicas

e na microestrutura das argamassas, tanto no seu estado fresco como endurecido (CAMPAGNOLO; DAL MOLIN; VAZKE, 2008).

Para Mailvaganam e Deans (1992), em locais onde a alta resistência e a baixa porosidade e permeabilidade são requeridas, a sílica ativa é uma adição extremamente importante tanto para concretos como para argamassas.

2.1.5.1.2 Cinza de casca de arroz

Durante o crescimento do arroz, um revestimento para o grão é formado, conhecido como casca de arroz, que é um material com elevado volume e baixa densidade. Conforme Houson apud Pouey (2006), a cinza de casca de arroz (CCA) é um material fibroso constituído por celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%). As propriedades da cinza de casca de arroz (CCA) são fortemente ligadas à temperatura de queima da mesma, que influencia diretamente na qualidade do produto.

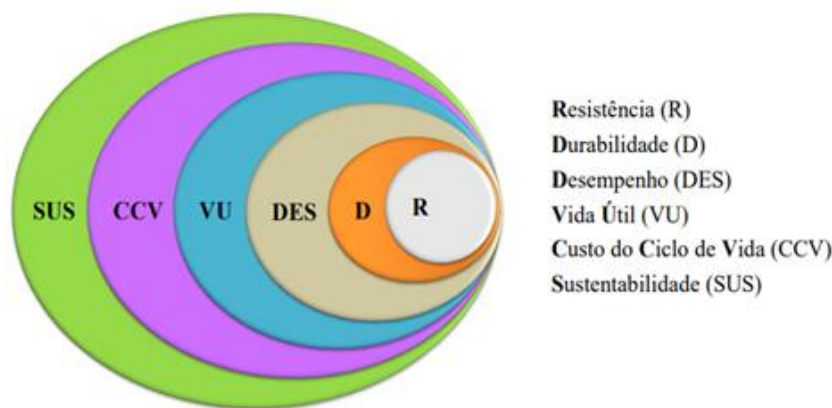
Pesquisas realizadas no Brasil com o uso da CCA como forma de adição a concreto, utilizam a cinza de casca de arroz com a maior reatividade possível, possibilitando assim maiores ganhos tanto de resistência quanto de durabilidade (RIGHI, 2015).

2.2 Durabilidade e vida útil das estruturas

As velocidades agregadas a obras na construção civil aliadas com a esbeltez das edificações e as constantes modificações do meio em que se encontram, apresentam um grande problema às estruturas de concreto armado, especialmente por conta das patologias e falhas que possam vir a se manifestar ao longo do tempo. Assim, para Clifton (1993), nas últimas décadas, aspectos voltados à extensão da vida útil e da durabilidade das estruturas são uma tendência mundial. A vida útil e a durabilidade das estruturas de concreto armado são conceitos diretamente ligados, devido à direta dependência entre ambos.

Conforme Possan (2010), as primeiras estruturas de concreto eram projetadas conforme o bom senso e a experiência profissional de engenharia, sendo a resistência à compressão a sua única característica controlada. Devido à evolução dos materiais de construção, dos métodos de cálculo e os diferentes ambientes de exposição, verificou-se que a resistência não era aceitável para as exigências de projeto, enfatizando-se assim a durabilidade da estrutura, sendo aliada posteriormente ao seu desempenho. Os conceitos como vida útil, ciclo de vida e custo do ciclo de vida foram inseridos como variáveis importantes para o projeto, tornando possível diversos estudos de estimativas de manutenção, custos e impactos da estrutura, viabilizando projetos voltados para a sustentabilidade. A Figura 1 apresenta a evolução dos conceitos relacionados ao projeto das estruturas de concreto armado.

Figura 1 - Evolução do projeto das estruturas de concreto



Fonte: Possan (2010).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) descreve a durabilidade como a capacidade de resistência da estrutura às influências ambientais já previstas e definidas durante os projetos da mesma. A referida norma apresenta ainda que estas estruturas devem ser construídas conforme as condições previstas em projeto, conservando a estabilidade, a segurança e a aptidão de serviço durante toda a sua vida útil estimada.

Segundo NBR 6118 (ABNT, 2014), a vida útil de projeto aplica-se a todas as partes que compõe a estrutura, podendo apresentar valores distintos para cada componente da mesma. A norma define ainda que a vida útil de projeto compreende o período de tempo em que todas as características da estrutura de concreto armado são conservadas, sem que ocorram intervenções significativas, atendendo aos

requisitos de uso e manutenção conforme prescritos pelo projetista e construtor, compreendendo também a execução dos reparos decorrentes de acidentes.

Diversas normas, documentos internacionais, além de artigos de especialistas em estruturas de concreto, apresentam uma série de procedimentos que podem ser realizados a fim de garantir a boa qualidade, a elevada vida útil e desempenho adequado da estrutura. Na NBR 12655 (ABNT, 2015) são apresentados diversos aspectos a serem levados em consideração na elaboração e execução de projetos, utilizando concreto de cimento Portland, assim como o disposto no *Model Code for Service Life Design*, desenvolvido pela Federação Internacional de Estruturas de Concreto (FIB, 2006), que apresenta pelo menos três tópicos que devem ser levados em consideração na vida útil das estruturas:

- a) métodos de projeto ou verificação da vida útil no projeto;
- b) procedimentos de execução e controle de qualidade;
- c) procedimentos de uso, operação e manutenção.

Conforme Medeiros, Andrade e Helene (2011), e Neville (2001), a durabilidade de uma estrutura não pode ser definida como uma propriedade particular ou intrínseca por ser resultante dos processos de interação da mesma com o ambiente e devido as condições de uso, operação e manutenção na qual a estrutura encontra-se exposta. Deste modo, a durabilidade está atrelada ao desempenho satisfatório que a estrutura apresenta durante a sua vida útil, conforme a finalidade para qual foi projetada, mantendo suas condições de serviço durante este período.

A durabilidade das estruturas pode ser definida como a capacidade dos materiais empregados em uma construção resistirem aos efeitos da agressividade do ambiente no qual encontram-se expostas. Quando expostos aos fatores agressivos presentes no meio, estes materiais tendem a se deteriorar até atingir o final de sua vida útil, quando o grau de deterioração atingir os limites máximos especificados em projeto. Nesse momento, a estabilidade e o pleno desempenho da estrutura estarão em risco e necessitarão de reparos para a sua estabilização (CABRERA, 2014).

Conforme Andrade e Silva (2005), para que um sintoma seja considerado uma manifestação patológica, este deve comprometer capacidades mecânicas, funcionais

ou estéticas da construção. Devido às patologias serem diretamente influenciadas pelo tipo de uso, tempo de uso e condições de exposição, pode-se perceber uma relação direta entre durabilidade, desempenho e vida útil da edificação. Os autores apresentam alguns conceitos básicos comumente utilizados para expressar as patologias encontradas, como:

- a) sintoma ou anomalia: indicação de ocorrência de defeito;
- b) defeito: desacordo ou não conformidade de qualquer material que compõe a estrutura, indicando um desvio no comportamento previsto a estrutura. Pode ou não causar uma falha;
- c) falha: tipos de irregularidades que podem interferir no pleno desempenho da estrutura;
- d) reparo: ação que busca resolver os problemas apresentados, devolvendo às condições de estabilidade a estrutura;
- e) causas: natureza da degradação pode ser física, química, biológica ou mecânica;
- f) origem da deterioração: relacionada às etapas do ciclo de vida da estrutura em que a patologia surgiu.

O pleno conhecimento do ambiente no qual a estrutura se encontra inserida, características dos materiais que a compõe e as particularidades do uso da estrutura auxiliam na previsão de comportamento da mesma, na economia, sua durabilidade e na prevenção de manifestações patológicas (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade das estruturas de concreto armado é diretamente dependente de fatores como: a resistência mecânica do concreto, a relação água-cimento (a/c), a porosidade, a densidade e a permeabilidade do concreto, o local de execução do mesmo e a agressividade presente no meio em que este se encontra. Com base nestes fatores, a referida norma estabelece os parâmetros de qualidade a serem utilizados na estrutura, como tipo de concreto a ser utilizado e cobrimento nominal da armadura. O Quadro 2 apresenta diferentes

ambientes de exposição das estruturas, o grau de agressividade destes e o risco de deterioração da estrutura.

Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Ambiente de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Fonte: Adaptado pela Autora com base na NBR 6118 (ABNT, 2014, p.16).

Com base no Quadro 2 apresentada acima, é possível determinar o concreto que mais adequa-se ao tipo de estrutura a ser realizada, assim como a relação a/c da estrutura.

A Tabela 4 apresenta a relação água/cimento recomendada e as resistências mínimas exigidas para cada uma das quatro classes de agressividade do meio, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), que além do tipo de concreto recomendado para a estrutura, determina o valor mínimo do cobrimento a ser aplicado, garantindo-se a proteção da armadura que compõe o elemento estrutural.

Tabela 4 -Classe de agressividade do meio e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p.18).

A Tabela 5 apresenta os cobrimentos mínimos requeridos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) conforme a classe de agressividade do meio e o tipo de componente da estrutura.

Tabela 5 - Cobrimento mínimo para estruturas de concreto armado

Componente ou elemento	Classe de agressividade do meio			
	I	II	III	IV
	Cobrimento nominal (mm)			
Laje	20	25	35	45
Viga/pilar	25	30	40	50
Elementos estruturais em contato com o solo	25	25	40	50

Fonte: Adaptado pela Autora com base na NBR 6118 (2014, p.20).

Conforme Medeiros, Andrade e Helene (2011), no Brasil, a maioria das obras já realizadas não possui o concreto recomendável em sua execução, porém medidas de proteção e manutenção podem garantir que a vida útil da estrutura ocorra de forma satisfatória conforme as especificações dos usuários e normativas. O autor ainda apresenta que os métodos de correção de estruturas degradadas que buscam a durabilidade que poderia ser atingida na fase de projeto, podem resultar em custos elevados.

2.3 Degradação de estruturas

Para Nepomuceno (2005), a degradação das estruturas de concreto armado é devida à penetração de líquidos, vapores e gases, através das fissuras ou poros presentes na estrutura. Fatores como a umidade, a orientação e velocidade dos ventos, as variações de temperatura, a presença de substâncias agressivas no meio, a periodicidade das chuvas, além dos materiais que compõe o concreto e a porosidade do mesmo, são de extrema importância na interação entre o meio ambiente e o concreto. Lima (2005) ainda apresenta que o conhecimento pleno do meio ambiente de interação (químico e físico) com a estrutura é de extrema importância, devido à forte influência que estes mecanismos exercem.

Em estruturas de concreto armado, o processo de deterioração dificilmente ocorre devido à causa isolada. Um concreto pode apresentar qualidade satisfatória, porém um único fator adverso ao qual a estrutura é sujeita pode desencadear o processo de deterioração. A permeabilidade do concreto está ligada diretamente à vulnerabilidade da estrutura a agentes externos, ou seja, quanto mais elevada a

permeabilidade do concreto, maior será a sua vulnerabilidade (SANTOS, 2012). Esta permeabilidade é dependente, além da porosidade, das dimensões, da forma, da distribuição, do caminho em que o fluido percorre nos poros e da interconectividade da rede capilar. Desta forma, a impermeabilidade do concreto deve apresentar-se como a primeira defesa contra o ataque de agentes que propiciam a degradação da estrutura, sejam eles processos químicos ou físicos (NEVILLE, 1997).

Poggiali (2009) afirma que entre os principais agentes de degradação estão:

[...] as temperaturas; a água em todos os seus estados; agentes provenientes do ar; gases (como, por exemplo, CO₂, NO₂, O₂); agentes químicos (cloretos e sulfatos); ação de sobrecargas na estrutura, abrasão, entre outros. É importante destacar que mais de um agente de deterioração pode atuar simultaneamente no concreto. A análise em separado de cada fenômeno de deterioração impede a percepção da interação desses fenômenos na estrutura, o que pode levar a um erro de diagnóstico da patologia. (POGIALLI, 2009, p. 17 e 18)

Conforme Santos (2012), nas causas frequentes de deterioração das estruturas, um ou mais agentes interagem com a estrutura de concreto e o aço que a constitui, causando gradativamente a redução do seu desempenho. Assim, o conhecimento e compreensão das causas que levam ao desenvolvimento do processo de deterioração do concreto são de indispensável conhecimento. As quatro causas principais responsáveis pela degradação das estruturas de concreto armado são classificadas conforme a sua natureza:

- a) eletroquímicas;
- b) físicas;
- c) mecânicas;
- d) químicas.

No Quadro 3, as causas, os mecanismos, os sintomas e os locais diretamente afetados da estrutura, são apresentados de maneira resumida.

Quadro 3 - Causas, mecanismos e sintomas da deterioração em estruturas de concreto

Causas	Mecanismos	Sintomas	Afeta
Mecânica	Choques e impactos.	Fissuração e lascamento do concreto; possível perda de armadura.	Concreto e armadura
	Recalque diferencial das fundações		
	Agentes imprevisíveis		
Física	Desgaste superficial (atrito e cavitação)	Desgaste superficial do concreto	Concreto
	Cristalização de sais nos poros do concreto	Fissuração e escamamento do concreto	Concreto
	Retração hidráulica no concreto em estado fresco	Fissuração do concreto	Concreto
	Gradiente térmico	Fissuração do concreto	Concreto
	Ação do fogo	Fissuração; desidratação da pasta de cimento; ruptura e colapso da armadura	Concreto e armadura
Química	Reação Álcali-agregado	Expansão e fissuração do concreto	Concreto
	Hidratação dos óxidos do cimento		
	Ataque por sulfatos	Decomposição química da pasta; despassivação da pasta; expansão. Fissuração; perda de resistência	Concreto
	Ataque por ácidos	Decomposição química da pasta e lixiviação da pasta de cimento; eflorescências	Concreto
Causas	Mecanismos	Sintomas	Afeta
	Água pura	Decomposição química; dissolução e lixiviação da pasta de cimento, eflorescências	Concreto
	Carbonatação	Redução progressiva do pH do concreto e despassivação do aço	Concreto e aço
	Ataque por cloretos	Despassivação do aço e posterior corrosão das armaduras	Concreto e aço
Eletroquímica	Corrosão das armaduras	Deterioração e perda de seção do aço; perda de aderência aço-concreto; expansão; fissuração e lascamento do concreto	Inicialmente aço e depois concreto

Fonte: Adaptado pela Autora com base em Santos (2012, p.10).

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma das quatro principais causas de redução da durabilidade das estruturas, que é a degradação eletroquímica. A seguir

serão apresentados os principais fatores que levam ao desenvolvimento do processo de corrosão das armaduras (degradação eletroquímica).

2.3.1 Causas químicas

A manifestação das causas químicas de deterioração da estrutura são dadas através de efeitos como o aumento da permeabilidade e porosidade, a diminuição da resistência, o surgimento de fissuras e destacamentos e pela decomposição química da estrutura. Para Poggiali (2009), estas manifestações podem ocorrer por causas externas, como devido a ação de agentes presentes no meio no qual se encontra a estrutura, e por causas internas, como por reações do concreto ou reação álcali-agregado.

As principais causas de deterioração por agentes químicos como apresentado na Quadro 3 são, a hidratação dos óxidos do cimento a reação álcali-agregado, os ataques por sulfatos e ácidos, a água, o ataque por cloretos e a carbonatação.

2.3.2 Causas eletroquímicas

As causas eletroquímicas limitam-se na corrosão das armaduras, atacando a armadura inserida no interior do concreto, expandindo-se para o concreto.

Para Helene (1986), a corrosão do aço presente em estruturas de concreto tem como causa aspectos eletroquímicos influenciados pela umidade. O autor ainda afirma que em umidades relativamente baixas o aço não sofre corrosão, porém, em valores de umidade acima de 60% o processo de corrosão torna-se acelerado. Para Gentil (2003), o processo de corrosão torna-se acelerado em valores de teor de umidade superiores a 70%.

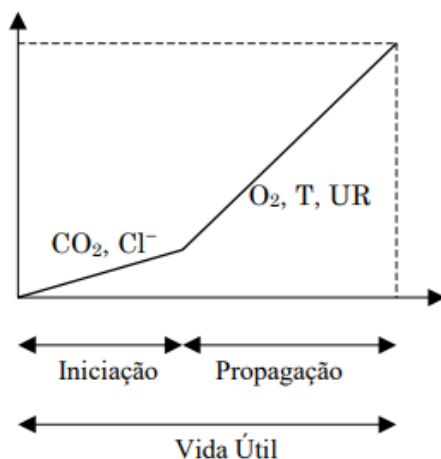
2.3.2.1 Corrosão das armaduras

Conforme Soares et al. (2015), a corrosão pode ser estabelecida como um processo resultante de interações do material com o meio ambiente, resultando em reações eletroquímicas e químicas, podendo estar ou não associadas a ações mecânicas e físicas, que levam à destruição do material. A manifestação deste tipo de patologia em armaduras de concreto é dada por meio de fissuras, manchas superficiais, destacamento de cobrimento de concreto e pela perda de massa das armaduras. Conforme Casudo (1997), a expansão das barras pode chegar a cerca de 600% do volume original, sendo que as pressões podem atingir até cerca de 40 MPa.

Para Gentil (2003), em materiais, a corrosão pode ser determinada como a ação eletroquímica ou química, aliada ou não a esforços mecânicos, conforme o ambiente na qual são expostas, podendo manifestar-se na forma de oxidação ou na corrosão propriamente dita.

Tuutti (1982) apresenta que a corrosão das armaduras pode ser representada pela Figura 2, que divide o processo corrosivo nas etapas de iniciação e propagação. A etapa de iniciação consiste no tempo necessário para que os agentes agressivos consigam atingir a armadura, já a segunda etapa, conhecida como fase de propagação, consiste na corrosão propriamente dita da armadura.

Figura 2 - Mecanismo de corrosão de estruturas de concreto armado



Fonte: Tuutti, (1982).

A corrosão das armaduras que compõe as estruturas de concreto tem três consequências importantes, conforme Cabral (2000):

- a) afeta a própria armadura, provocando perda de sua seção transversal e redução na sua resistência mecânica;
- b) provoca a formação de hidróxidos e óxidos, que geram uma tendência à expansão ao incorporarem muitas moléculas de água, que devido ao aumento da tensão podem gerar o aparecimento de fissuras;
- c) causa perturbações no pleno funcionamento entre aço e concreto, comprometendo sua durabilidade.

2.3.2.1.1 Corrosão química

A oxidação, que também é conhecida como corrosão química, é dada por uma reação gás-metal com a geração de uma película de óxidos, sendo um processo lento que não provoca a deterioração superficial das barras metálicas (CASCUDO, 1997).

Conforme Helene *apud* Polito (2008), este processo ocorre durante a fabricação das barras, aplicando a superfície destas uma película uniforme, compacta e pouco permeável, servindo em alguns casos como proteção para o aço.

2.3.2.1.2 Corrosão aquosa ou corrosão eletroquímica

Para Cascudo (1997), a corrosão aquosa ou eletroquímica, conhecida como a corrosão propriamente dita, é a forma de corrosão que leva problemas às obras de construção civil. Esta forma de corrosão ocorre em meio aquoso, resultando na produção de uma célula de corrosão eletroquímica.

Conforme Helene (1986), a corrosão eletroquímica propende a produzir óxidos de ferro, que necessitam das seguintes condições especiais para manifestarem-se:

- a) existência de um eletrólito;
- b) existência de diferença de potencial;
- c) existência de oxigênio;

d) existência ou não de agentes agressivos.

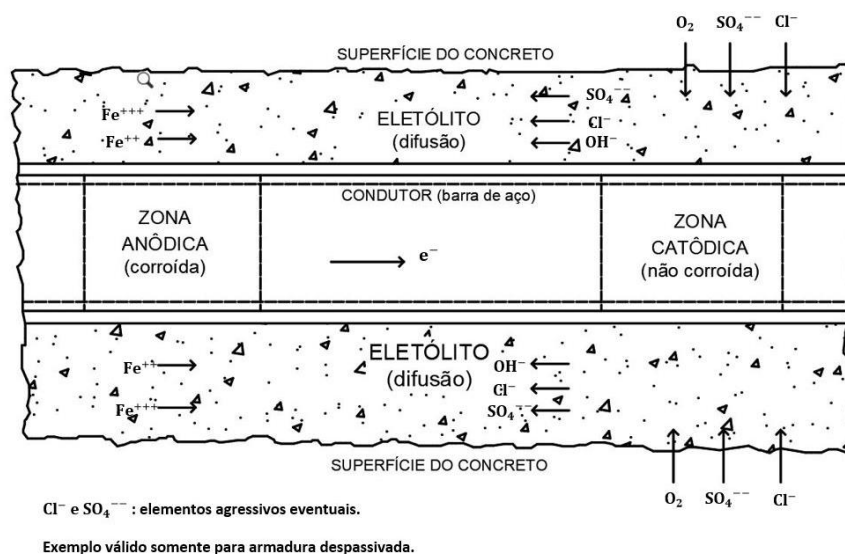
Comim e Estacechen *apud* Cascudo (2017), afirma que os mecanismos de corrosão eletroquímica causam a formação de pilhas eletroquímicas, podendo ocorrer em regiões distintas em uma mesma solução, como nas armaduras componentes do concreto armado.

Conforme Gentil (2003), uma pilha eletroquímica possui basicamente os seguintes componentes:

- a) ânodo: que consiste em um eletrodo em que há a oxidação. É meio no qual a corrente elétrica entra no eletrólito por meio de íons positivos;
- b) cátodo: eletrodo no qual a corrente elétrica do eletrólito e as cargas negativas provocam reações de redução;
- c) condutor: usualmente líquido que contem íons que transportam a corrente elétrica do ânodo até o cátodo;
- d) círculo metálico: forma de ligação entre o ânodo e o cátodo, é por onde escoam os elétrons, no sentido ânodo-cátodo.

A Figura 3 apresenta o esquema de ocorrência da corrosão em uma célula de concreto armado.

Figura 3 - Célula de corrosão em concreto armado



Fonte: Helene (1986).

Conforme o exposto por Helene (1986), soluções que evitem a corrosão das barras de aço constituintes do concreto armado devem ser previstas durante o projeto, pois no interior do mesmo sempre há os requisitos mínimos necessários para o início do processo corrosivo. Concretos em sua condição saturada não apresentam ocorrências de corrosão, pela falta de acesso suficiente ao oxigênio e à ausência de eletrólito, respectivamente.

Substâncias como cloretos, sulfetos, dióxido de carbono e os nitritos, podem provocar corrosão das armaduras de forma precipitada, devido ao fato de em contato com o concreto provocarem a ruptura da camada passiva que protege as barras de aço, facilitando assim a corrosão das mesmas (HELENE,1986).

2.3.2.2 Corrosão induzida por cloretos

Conforme Mota et al. (2012), a corrosão das armaduras presentes em estruturas de concreto armado, pode ser dada como uma das principais causas de deterioração das estruturas, sendo devida à ação de cloretos, que são altamente agressivos mesmo em concretos com elevados valores de pH. No concreto, os cloretos podem encontrar-se concentrados devido à presença dos componentes da mistura contaminados (agregados, água e aditivos), ou por meio de penetração através dos poros presentes no concreto, causando a despassivação da armadura por cloretos.

A despassivação é definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014) como a ruptura local da camada passiva da estrutura devido ao elevado teor de íon-cloro. Características específicas da obra, como o tipo de concreto utilizado, a espessura do cobrimento da armadura, o controle de fissuras e porosidade do concreto, além do uso de adições, permitem uma maior prevenção ao ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto.

Conforme Cabrera (2014), os cloretos são agentes agressivos indutores da corrosão no aço, agem de modo rápido e em regiões pontuais, reduzindo a seção transversal das barras da armadura, levando a ruína se não controladas e

recuperadas. Para Santos (2006), os cloretos absorvidos pelos poros do concreto são transportados internamente no mesmo das seguintes formas:

- a) adsorção: é o primeiro passo da contaminação das estruturas de concreto armado, caracterizada pela retenção de líquidos ricos em íons de cloro;
- b) difusão: é o mecanismo de transporte predominante nos cloretos em concretos saturados, estando diretamente relacionado à diferença de concentração de cloretos nos diferentes ambientes do concreto;
- c) migração iônica: migração dos íons de cloreto pelo próprio campo gerado no processo eletroquímico;
- d) permeabilidade: é caracterizada pela absorção de fluidos devido à pressão, sendo que quanto maior o diâmetro dos poros, mais acentuada esta forma de absorção ocorre.

Cabrera (2014) apresenta em seu trabalho que a dimensão dos poros do concreto é de elevada importância, no transporte de cloretos e outras substâncias dissolvidas. Os poros presentes no concreto podem variar de tamanho na pasta de cimento na forma endurecida, sendo classificados conforme a sua ordem de grandeza, como apresentado abaixo:

- a) de ar aprisionado: decorrentes do adensamento do concreto;
- b) de ar incorporado: obtidos por meio de aditivos incorporadores de ar;
- c) capilares: obtidos na saída da água livre no concreto;
- d) de gel: devidos à água de gel.

2.4 Método CAIM - corrosão por imersão modificada

Uma das metodologias mais utilizadas como forma de aceleração da corrosão de elementos de concreto é o método CAIM – corrosão por imersão modificada, utilizado pela primeira vez em 1990. O método, desenvolvido por pesquisadores da UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, consiste na exposição de

corpos de prova de concreto armado à uma solução de cloretos aliada a corrente elétrica, buscando facilitar a migração dos cloretos para a armadura (GRAEFF, 2007).

Os ensaios de corrosão acelerada são frequentemente utilizados para entender o modo no qual a corrosão da armadura afeta as propriedades do aço que está inserido no concreto e como é dada a progressão e efeitos da mesma. Para que a corrosão acelerada ocorra é necessária a combinação de soluções agressivas, frequentemente contendo cloretos, aliadas à aplicação de uma diferença de potencial (d.d.p), para obter-se uma indução eletroquímica. A corrente aplicada deve ser constante, para que não ocorra o aquecimento dos corpos de prova e a distorção mecânica do processo, que dificulta o monitoramento dos danos gerados, desta forma, correntes constantes apresentam a possibilidade de um maior controle sobre a taxa de corrosão.

De acordo com Torres (2006), o ensaio eletroquímico tem como finalidade avaliar a perda de massa das barras e determinar as consequências da corrosão causada no aço. O método possibilita ainda examinar o grau de corrosão e definir a quantidade de aço deteriorada no processo. A autora salienta ainda que o método CAIM pode ser considerado como um ensaio de análise visual e rápida da corrosão em armaduras, sendo ao mesmo tempo um ensaio que requer elevada dedicação, devido à necessidade de acompanhamento da evolução da corrente e aos registros das mudanças ocorridas. Durante o ensaio, é necessário garantir o correto posicionamento das barras de aço nos corpos de prova ensaiados, além da adequada cura dos mesmos.

O ensaio pioneiro desenvolvido no LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS foi realizado inicialmente em um pequeno aquário de vidro, preenchido com uma solução 0,6 Molar de cloreto de sódio (NaCl), tendo o corpo de prova em seu interior ligado a uma placa metálica ligada a uma fonte de alimentação. O polo oposto apresentava-se fixo na armadura do corpo de prova, aplicando-se uma diferença de potencial de 60 V. O ensaio ocorria durante 7 horas, sendo acompanhada a degradação dos corpos de prova. Terminado o ensaio, os corpos de prova eram rompidos, suas barras removidas, limpas e pesadas, permitindo a realização da avaliação da perda de massa de cada barra (TORRES, 2006).

Atualmente, os corpos de prova são posicionados em caixas com uma solução de cloretos de 35,0 g/L, sendo ligadas em série à uma fonte de alimentação com corrente constante. O tempo de ensaio é definido de acordo com o grau de corrosão esperado (CABRERA, 2014).

A Figura 4 apresenta o ensaio sendo realizado, à direita podem ser visualizados os corpos de prova e ao seu lado a fonte de corrente contínua.

Figura 4 - Realização do ensaio CAIM - vista da fonte e dos corpos de prova



Fonte: Stein (2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as características dos materiais, os equipamentos e os métodos de ensaios propostos pelas normas brasileiras vigentes a serem empregados a fim de que todos os objetivos propostos sejam atendidos, além do programa experimental do presente trabalho.

3.1 Programa experimental

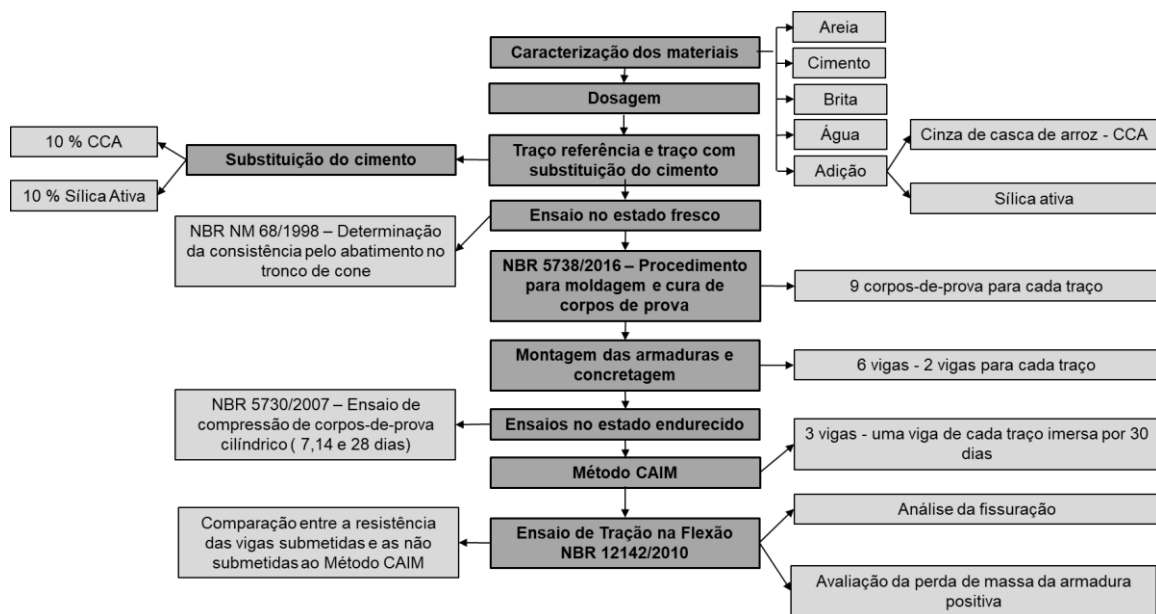
Este estudo teve como principal objetivo avaliar a durabilidade de vigas submetidas à corrosão acelerada pelo método denominado CAIM. Todos os procedimentos e ensaios foram realizados nas dependências do Laboratório de Tecnologias da Construção da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES.

Foram moldadas seis vigas com dimensões de 100 x 15 x 10 cm, duas sendo traço referência, duas com adição de cinza de casca de arroz e outras duas com adição de sílica ativa. Todas as vigas foram colocadas em imersão em tanques para a corrosão acelerada. Para cada um dos traços foram moldados nove corpos de prova, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para verificação da resistência a compressão simples. Após 28 dias de cura em ambiente controlado, três das seis vigas moldadas, uma de cada traço, foram colocadas em imersão conforme o método CAIM, sendo retiradas após 30 dias. Durante o período de tempo foi acompanhada visualmente a dissipação da corrosão nas mesmas. Após o tempo de ensaio de aceleração da corrosão, realizou-se o ensaio de resistência à tração na flexão, também conhecido

como flexão a 4 pontos, a análise da fissuração das vigas e a da perda de massa das mesmas.

Na Figura 5 são apresentadas as etapas do programa experimental, compreendendo desde a moldagem das vigas até os ensaios destrutivos realizados nas mesmas, bem como a análise de cada ensaio realizado nas vigas.

Figura 5 - Fluxograma dos ensaios



Fonte: Autora (2019).

3.2 Materiais

Os materiais empregados interferem diretamente na qualidade e durabilidade do concreto a ser executado. Desta forma deve-se conhecer plenamente as características dos mesmos. Serão descritos a seguir os materiais utilizados na composição da massa cimentícia das vigas.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado para a concretagem das vigas foi o cimento CP V – ARI de Alta Resistência Inicial da marca CIMPOR, produzido pela indústria *InterCement* Brasil. Conforme o fabricante, o material atende as exigências da NBR 16697:

Cimento Portland - requisitos (ABNT, 2018), apresentando massa específica de aproximadamente $3,15 \text{ g/cm}^3$.

A alta resistência inicial do produto é dada pela maior presença de silicato tricálcico (C_3S), que confere maior velocidade nos processos de hidratação do cimento e acelerado ganho de resistência logo nos primeiros dias. O material é comumente utilizado em situações que demandam alta resistência inicial, desforma rápida e na fabricação de peças pré-moldadas e protendias, podendo alcançar em 24 horas resistências iniciais acima de 21 MPa.

3.2.2 Água de amassamento

A água utilizada para amassamento do concreto é oriunda do abastecimento público do município de Lajeado, fornecida pela CORSAN. Conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), as águas utilizadas para o abastecimento público são consideradas adequadas para o uso em concreto, não necessitando a realização de ensaios.

3.2.3 Agregado miúdo

Como agregado miúdo utilizou-se areia média, de origem quartzosa natural disponibilizada pelo LATEC - UNIVATES. Para o conhecimento físico do material, realizaram-se ensaios de caracterização como granulometria, massa específica e unitária conforme disposto nas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR 52 (ABNT, 2009) e NBR 45 (ABNT, 2006), respectivamente.

3.2.3.1 Determinação da granulometria

Realizou-se a caracterização granulométrica do agregado miúdo conforme a NBR 248 (ABNT, 2002), com uma amostra de 500 g do material previamente seca em estufa entre $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. As peneiras usadas são da marca *Pavitest*, de série normal conforme os padrões especificados na NBR NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010). O conjunto de peneiras com o material foi peneirado em agitador de peneiras da marca

por 5 minutos, conforme apresenta a Figura 6. O ensaio foi realizado para duas amostras distintas do agregado miúdo.

Figura 6 - Peneiramento do agregado miúdo



Fonte: Autora (2019).

Após, cada fração de areia retida nas peneiras foi pesada em balança de precisão, possibilitando a realização da distribuição granulométrica das duas amostras, conforme indicado na Tabela 6. Com base na classificação através do módulo de finura apresentada na NBR 7211 (ABNT, 2009), pode-se perceber que trata-se de uma areia média.

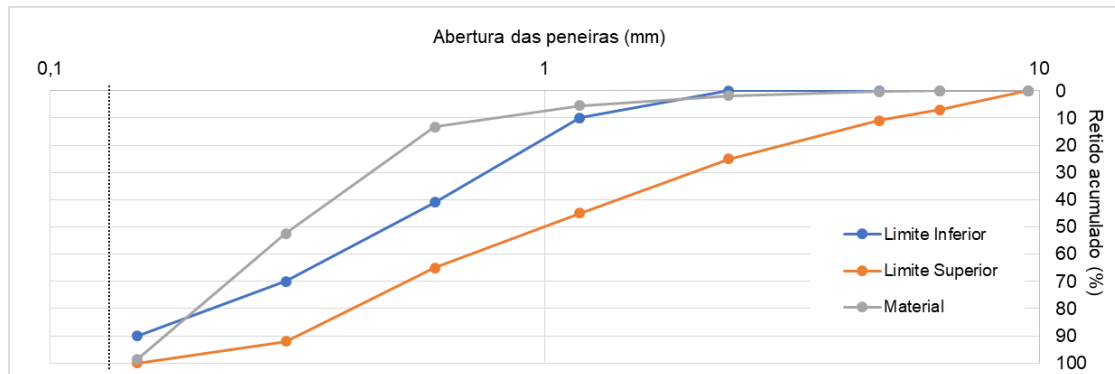
Tabela 6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Malha (mm)	Massa (g)		Retida (%)		Retida variações (%)	Retida Média (%)	Retida Acumulada (%)
	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio A	Ensaio B			
9,5	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,3	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	1,7	2,1	0,34	0,42	0,08	0,38	0,38
2,36	5,6	9,6	1,11	1,92	0,80	1,52	1,89
1,18	18,3	17,9	3,64	3,58	0,06	3,61	5,50
0,6	39,3	39,2	7,81	7,83	0,02	7,82	13,32
0,3	207,3	185,2	41,22	37,00	4,23	39,11	52,43
0,15	223,9	239,6	44,52	47,86	3,34	46,19	98,62
Fundo	6,8	7	1,35	1,40	0,05	1,38	100,00
Total	502,9	500,6	Módulo de Finura = 2,72			DMC = 4,75	

Fonte: Autora (2019).

A distribuição granulométrica também encontra-se ilustrada no Gráfico 1, que relaciona o material analisado aos limites de utilização impostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo

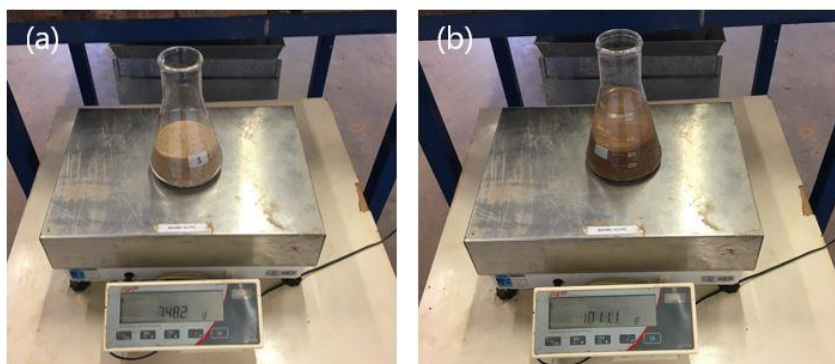


Fonte: Autora (2019).

3.2.3.2 Massa específica e massa unitária

A massa específica do agregado miúdo utilizado na massa cimentícia foi determinada por meio de ensaio estabelecido pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), no qual encontrou-se um valor de $2,35 \text{ g/cm}^3$. O ensaio consiste na relação entre o agregado seco em estufa e a quantidade de água que ocupa um volume igual ao total de sólidos do agregado. Os procedimentos do ensaio podem ser visualizados na Figura 7, onde na Figura 7(a) é apresentado o frasco com a amostra do material e na Figura 7(b) a pesagem do frasco, acrescidos a amostra e a água até a marca de 500 ml.

Figura 7 - Procedimentos para determinação da massa específica da areia



Fonte: Autora (2019).

A massa unitária foi executada conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), na qual uma amostra do agregado miúdo foi despejada em um recipiente de volume conhecido. A altura de queda seguiu o “Método C”, descrito na referida norma, conforme apresentado na Figura 8. Para o agregado miúdo encontrou-se massa unitária de 1,40 g/cm³.

Figura 8 - Procedimento para determinação da massa unitária da areia



Fonte: Autora (2019).

3.2.4 Agregado graúdo

Como agregado graúdo utilizou-se brita basáltica do tipo 1. Para o conhecimento físico da mesma realizou-se ensaios de caracterização, como granulometria, massa específica e massa unitária, realizados conforme as NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR 53 (ABNT, 2009), respectivamente.

3.2.4.1 Determinação granulométrica

A faixa granulométrica da brita foi encontrada por meio da realização do ensaio de determinação de composição granulométrica, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a execução do ensaio levou-se a estufa entre 105 ± 5 °C cerca de 1000 g de brita, que após seca foi despejada em um conjunto de peneiras de série normal

e intermediária (malha de 19, 12,5, 9,5, 6,3, 4,75 mm), levando o conjunto ao agitador de peneiras por 5 minutos, conforme a Figura 9. O processo foi repetido duas vezes, com amostras distintas do material.

Figura 9 - Peneiramento do agregado graúdo



Fonte: Autora (2019).

Ao final do ensaio, pesou-se a fração de brita retida em cada uma das peneiras, permitindo a realização da distribuição granulométrica das duas amostras conforme a Tabela 7.

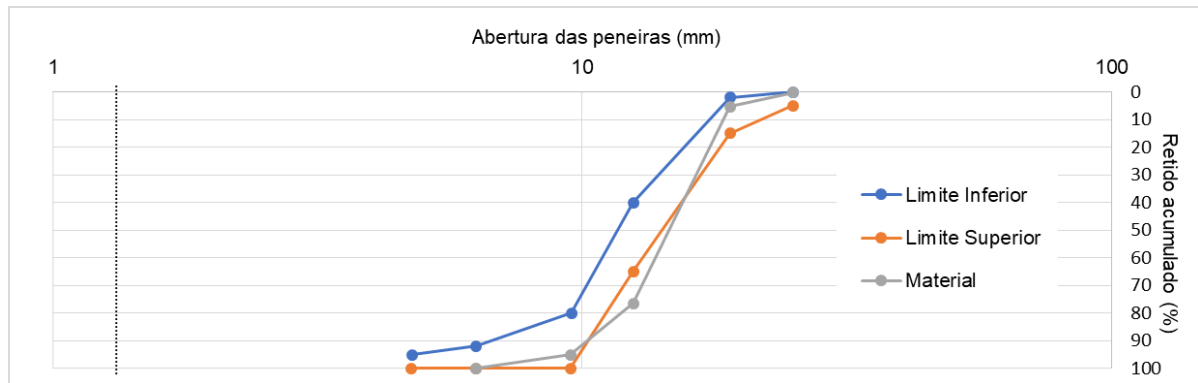
Tabela 7 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Malha (mm)	Massa (g)		Retida (%)		Retida variações (%)	Retida Média (%)	Retida Acumulada (%)
	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio A	Ensaio B			
25	6,10	0,00	0,61	0,00	0,00	0,30	0,30
19	76,20	29,90	7,59	2,96	4,63	5,28	5,28
12,5	763,30	670,60	76,06	66,38	9,69	71,22	76,50
9,55	128,60	244,10	12,82	24,16	11,35	18,49	94,98
6,3	29,30	65,70	2,92	6,50	3,58	4,71	100,00
4,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fundo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	1003,5	1010,3					

Fonte: Autora (2019).

Com base na tabela distribuição granulométrica acima apresentada, foi realizada a curva granulométrica para cada uma das amostras, que podem ser analisadas no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: Autora (2019).

3.2.4.2 Determinação na massa específica e massa unitária

Os padrões de ensaio estabelecidos na NBR NM 53 (ABNT, 2009) foram seguidos para a determinação da massa específica do agregado graúdo utilizado. O ensaio consiste em observar a diferença de peso do material quando submerso, saturado de superfície seca e seca em estufa (FIGURA 10). Desta forma, para massa específica da brita encontrou-se o valor de $2,62 \text{ g/cm}^3$.

Figura 10 - Procedimento para determinação da massa específica da brita



Fonte: Autora (2019).

Nota: A Figura (a), apresenta o agregado após 24 horas submerso na água, enquanto a Figura (b), apresenta o material após a secagem em pano absorvente, e a Figura (c), a pesagem do material em água.

A massa unitária foi determinada conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), encontrando-se um valor de $1,25 \text{ g/cm}^3$. Neste ensaio, uma amostra de agregado graúdo foi despejada em um recipiente de volume conhecido, seguindo-se o “Método C”, da respectiva Norma, que indica que o agregado deve ser despejado de uma altura de no máximo 50 mm da borda superior do recipiente, conforme pode ser analisado na Figura 11.

Figura 11 - Procedimento para determinação da massa unitária da brita



Fonte: Autora (2019).

3.2.5 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz utilizada foi fornecida pela empresa *Pilecco Nobre*, sendo proveniente da queima controlada por combustão. Foi realizada a substituição de 10% do cimento do traço de referência, para a realização das duas vigas de $100 \times 15 \times 10 \text{ cm}$. O material possui massa específica de aproximadamente $1,90 \text{ kg/m}^3$.

A adição deste material no concreto produz efeitos no estado fresco, como redução da exsudação e segregação dos materiais, aumento da trabalhabilidade e, aumento da resistência mecânica no estado endurecido, além da diminuição da permeabilidade (TASHIMA, 2006).

3.2.6 Sílica ativa

O material produzido pela marca *Tecnosil*, foi utilizado como forma de substituição parcial do cimento em um dos três traços realizados. Realizou-se a

substituição de 10% do cimento do traço de referência, para a realização das duas vigas de 100 x 15 x 10 cm.

Conforme o fabricante, esta sílica ativa atende os parâmetros NBR 13956-1 (ABNT, 2012), que determina as características do material para o uso em concretos e argamassas. O material possui massa específica de aproximadamente 2,20 kg/m³.

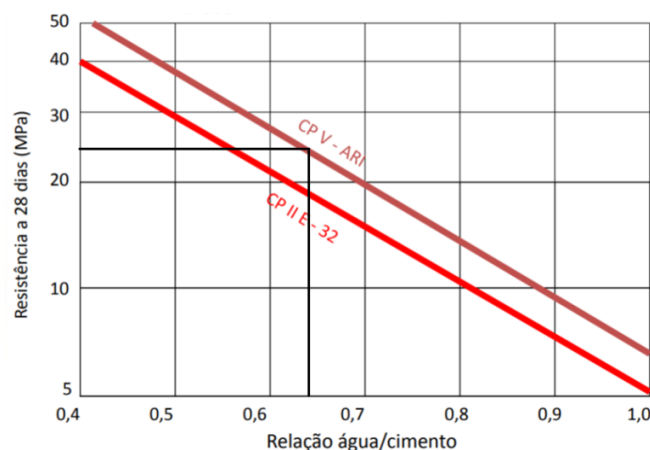
A sílica ativa é um material pozolânico, resultante do processo de fabricação das ligas de ferrosilício, dada em fornos elétricos de fusão a temperaturas de aproximadamente 2000 °C. As partículas deste material possuem diâmetro médio de 0,1 µm e 0,2 µm.

3.3 Dosagem

Para a dosagem do concreto utilizou-se o Método ABCP que consiste na adaptação do método desenvolvido pela ACI (*American Concrete Institute*) para agregados brasileiros. No método define-se uma relação a/c através das características dos materiais utilizados e da resistência desejada. Também é determinado no método o consumo de cada um dos materiais.

Por meio da curva de Abrans, que correlaciona os tipos de concreto com a resistência aos 28 dias e a relação água/cimento, determinou-se a relação água/cimento para os traços realizados. Desta forma, com a Figura 12, foi possível determinar uma relação a/c igual a 0,65 para a resistência de 25 MPa.

Figura 12 - Ábaco de Abrans CP V - ARI



Fonte: Adaptado pela Autora com base em ABESC (2016).

O consumo de cimento para o traço é diretamente dependente do consumo de água requerido para a mistura. O consumo de água aproximado é determinado através do abatimento de tronco de cone requerido para o concreto e do tipo de agregado utilizado (TABELA 8).

Tabela 8 - Consumo de água aproximado (Ca)

Abatimento (mm)	D _{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado pelo Autora com base em Ambrozewicz (2012).

A quantidade de cimento (C) em kg/m³ foi determinada pela razão entre o consumo de água (Ca) e a relação água/cimento (a/c), conforme apresentado pela Equação 1.

$$C = \frac{C_a}{a/c} \quad (\text{Equação 1})$$

Para a relação a/c encontrada anteriormente, chegou-se a 315,30 kg/m³ de cimento.

O agregado graúdo (Cb) que compõe o traço foi determinado com base no módulo de finura, dimensão máxima do agregado graúdo, volume do agregado seco por m³ de concreto e pela massa unitária compacta do agregado graúdo (Mc), conforme mostra a Equação 2. O volume do agregado seco (Vc) é encontrado por meio da Tabela 9.

$$C_b = V_c \times M_c \quad (\text{Equação 2})$$

Tabela 9 - Consumo de agregado graúdo

MF	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785

(Continua...)

(Conclusão.)

2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,468	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado pelo Autora com base em Ambrozewicz (2012).

Com a aplicação da Equação 2 e da Tabela 9, chegou-se a um consumo de brita 1 de 1006,5 kg/m³.

O consumo de agregado miúdo (C_M) foi definido com base no consumo de cimento, brita e água, como mostra a Equação 3.

$$C_M = \left(1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \right) \times \gamma_M \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

C_c , C_b , C_a : consumo de cimento, brita e água, respectivamente;

γ_c , γ_b , γ_a , γ_M : massa específica do cimento, brita, água e areia respectivamente.

Aplicando-se a equação encontrou-se como consumo de areia 845 kg/m³.

O traço unitário conforme o método ABCP é dado, pela razão entre o consumo de cada um dos materiais utilizados (cimento, areia, brita e água) pelo consumo de cimento, conforme apresenta a Equação 4.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad (\text{Equação 4})$$

Assim, o traço unitário utilizado foi 1:2,67:3,18 (cimento, areia e brita), com uma relação a/c de 0,65, de modo que garanta a resistência mínima de 25 MPa. Foram desenvolvidos três traços, sendo que em dois foi realizada a substituição parcial do cimento (10% em volume) por adições pozolânicas.

A partir da definição do traço, determinou-se a quantidade de material necessária para a execução de cada um dos traços conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Quantidade de material por traço

Traço	Materiais (kg)					
	Cimento	Areia	Brita	Água	CCA	Sílica Ativa
Traço Referência	13,77	36,62	43,62	8,90	-	-
10 % CCA	13,70	36,62	43,62	8,90	1,36	-
10 % Sílica Ativa	13,70	36,62	43,62	8,90	-	1,36

Fonte: Autora (2019).

A Figura 13 apresenta os materiais separados para a execução de cada um dos traços. Na Figura 13(a), é possível observar os materiais utilizados para a realização dos três traços, enquanto a Figura 13(b), apresenta a cinza de casca de arroz e a sílica ativa utilizadas.

Figura 13 - Materiais utilizados separados conforme determinado pelo traço



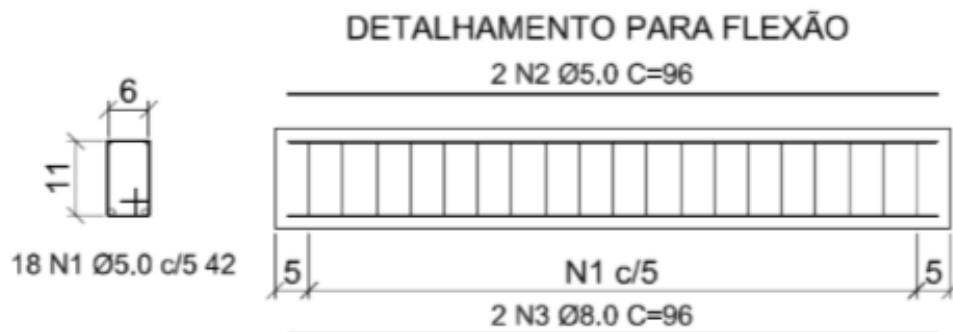
Fonte: Autora (2019).

3.4 Armaduras

As armaduras positivas utilizadas nas vigas foram de aço CA 50, com resistência característica de 500 MPa, e a armadura negativa e transversal foi executada com aço CA 60 que possui resistência característica de 600 MPa. As barras foram cortadas previamente conforme o projeto de armadura para as vigas. As vigas têm dimensão total de 100 x 15 x 10 cm.

As armaduras foram dimensionadas por Battisti (2017), conforme determinado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para o ensaio de flexão adaptado pelo LATEC - UNIVATES. O dimensionamento foi realizado conforme os mínimos estabelecidos pela referida norma para classe de agressividade II, com cobrimento nominal da armadura de 20 mm. Assim foram utilizadas duas barras de armadura positiva com diâmetro de 8 mm de aço CA 50 e duas barras negativas de aço CA 60 com diâmetro de 5 mm. Os estribos foram de aço CA 60 e ficaram dispostos a cada 5 cm, totalizando 18 estribos. A Figura 14 apresenta o detalhamento das armaduras para flexão.

Figura 14 - Detalhamento das armaduras



Fonte: Battisti (2017).

3.5 Execução dos elementos

3.5.1 Fôrmas

As fôrmas utilizadas para a moldagem das vigas foram confeccionadas em MDF liso para evitar imperfeições nas faces das mesmas. As fôrmas foram parafusadas garantindo-se a máxima estanqueidade. As dimensões internas foram rigorosamente respeitadas, definidas inicialmente em 100 x 15 x 10 cm, conforme apresenta a Figura 15.

Figura 15 - Fôrmas de MDF utilizadas



Fonte: Autora (2019).

3.5.2 Armadura

O corte, a dobra e a montagem da ferragem, seguiu o dimensionamento realizado por Battisti (2017). O corte foi realizado com o auxílio de máquina de corte para vergalhões e a dobra realizada com a assistência de uma morsa de bancada. Os cantos dos estribos que tem contato direto com a armadura transversal foram isolados, com o intuito de diminuir posteriormente, na etapa de corrosão acelerada, a corrosão da armadura transversal (FIGURA 16).

Figura 16 - Estribo finalizado



Fonte: Autora (2019).

Após a finalização dos estribos montou-se a armadura, conforme as especificações de projeto. Para a montagem, o posicionamento dos estribos foi previamente marcado com o auxílio de uma trena e giz. Os estribos foram amarrados com o arame queimado, iniciando-se a amarração na barra de 8 mm.

O passo seguinte foi a colocação de um cabo de cobre para garantir a diferença de potencial durante o ensaio CAIM sobre as barras positivas. A capa protetora do cabo de cobre foi completamente removida. Os pontos de amarração na armadura transversal foram isolados, para que se diminua a probabilidade da perda localizada da seção das barras de aço. Na Figura 17 é possível observar a amarração do fio de cobre na armadura positiva.

Figura 17 - Posicionamento dos fios de cobre sobre as armaduras positivas



Fonte: Autora (2019).

A Figura 18 apresenta as armaduras finalizadas, prontas para o posicionamento nas fôrmas. Durante a realização das mesmas, atentou-se também ao comprimento do fio de cobre necessário posteriormente para a ligação das vigas na fonte. Tanto as barras como a armadura finalizada foram mantidas em ambiente livre de ação de água e umidade.

Figura 18 - Armaduras finalizadas



Fonte: Autora (2019).

Todas as fôrmas de concreto apresentadas na Figura 15 receberam a aplicação de uma camada de desmoldante para facilitar a posterior desfôrma das vigas. Após esta etapa, as armaduras foram dispostas nas fôrmas, atentando-se para o posicionamento correto das mesmas conforme especificado em projeto. Para a garantia do cobrimento necessário utilizou-se espaçadores plásticos para o posicionamento das mesmas, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Espaçadores plásticos posicionados nas vigas



Fonte: Autora (2019).

3.5.3 Moldagem dos elementos de concreto

Os três tipos de concreto executados (traço referência, traço com substituição parcial do cimento por sílica e com substituição parcial por cinza de casca de arroz), foram produzidos em betoneira e lançados nas fôrmas em uma única etapa. Antes do lançamento, realizou-se o ensaio para determinação do abatimento do concreto (*slump test*), conforme descrito pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). O aparelho utilizado para esta verificação possui forma tronco de cone com diâmetro de 10 a 20 cm e altura de 30 cm, conforme mostra a Figura 20. O ensaio consiste na colocação de concreto fresco em 3 camadas, cada uma recebendo 25 golpes com uma barra de 16 mm de diâmetro. Para cada traço realizado requeria-se o abatimento padrão de 80 a 100 mm, sendo o mesmo alcançado em todos os ensaios.

Figura 20 - Aparelho utilizado no ensaio de abatimento



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 21 é apresentada a realização do ensaio de abatimento em um dos traços realizados.

Figura 21 - Realização do ensaio de abatimento



Fonte: Autora (2019).

Após a verificação da consistência, iniciou-se o lançamento do concreto nas fôrmas em etapa única. No intervalo entre cada lançamento realizou-se o adensamento com o auxílio de um vibrador por imersão (FIGURA 22). Além das vigas, nesta etapa foram moldados também 9 corpos de prova para determinação da resistência à compressão de cada um dos traços.

Figura 22 - Adensamento do concreto com auxílio de vibrador elétrico



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 23 são apresentadas as vigas moldadas com cada um dos traços executados com acabamento finalizado e prontas para o processo de cura.

Figura 23 - Vigas moldadas finalizadas e prontas para cura



Fonte: Autora (2019).

Após a moldagem das 2 vigas pertencentes a cada um dos traços, foram moldados os corpos de prova referentes a cada traço (3 CP's para cada idade) para a realização de ensaios de resistência à compressão no estado endurecido do concreto. Todo o ensaio foi realizado com base nos parâmetros expressos na NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016). Os corpos de prova cilíndricos foram moldados em fôrmas plásticas com dimensões conhecidas de $10,0 \pm 1$ cm de diâmetro por $20,0 \pm 1$ cm de altura, em duas camadas de 12 golpes cada. A Figura 24 apresenta os moldes utilizados e os corpos de prova finalizados.

Figura 24 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autora (2019).

Nota: A figura (A) apresenta os moldes para os corpos de prova. A figura (B) indica os corpos de prova moldados para a realização do ensaio de resistência a compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias.

3.5.4 Cura

Após a moldagem das seis vigas e dos 27 corpos de prova, os mesmos foram colocados sobre uma superfície lisa e livre de intempéries, onde iniciaram o processo de cura permanecendo por 24 horas. Após este período colocou-se os mesmos na câmara úmida com controle de umidade localizada no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC), como mostram as Figuras 25 e 26, respectivamente, onde os corpos de prova permaneceram até o momento da execução dos ensaios em estado endurecido, nas idades de 7, 14 e 28 dias, e as vigas até a execução do ensaio de CAIM, na idade de 28 dias.

Figura 25 - Corpos de prova na câmara úmida



Fonte: Autora (2019).

Figura 26 - Vigas na cura úmida



Fonte: Autora (2019).

3.5.5 Resistência à compressão simples

Os requisitos definidos pelas NBR 7215 (ABNT, 2019) e NBR 5739 (ABNT, 2018), foram utilizados para determinar a resistência à compressão do concreto.

O ensaio foi realizado com 3 corpos de prova para cada uma das seguintes idades: 7, 14 e 28 dias após a moldagem dos mesmos. Os corpos de prova apresentavam-se limpos e com base regularizada, sendo submetidos à ruptura por compressão através de prensa hidráulica *Emic 200PLUS* para ensaio uniaxial, como mostra a Figura 27.

Figura 27 - Realização do ensaio de compressão



Fonte: Autora (2019).

3.5.6 Corrosão acelerada por imersão modificada - CAIM

O ensaio de aceleração da corrosão iniciou-se 29 dias após a moldagem das vigas e concreto armado. Para a aceleração da corrosão em três das seis vigas moldadas foi utilizado o método CAIM, sendo uma viga referência, uma viga com substituição de 10% em volume de CCA e uma viga com substituição de 10% em volume de Sílica Ativa. Para garantir a indução eletroquímica, o ensaio propõe a imersão parcial de corpos de prova em uma solução de íons de cloreto, que migram da solução para as barras da armadura por meio de estímulos elétricos (diferença de potencial), iniciando o processo de corrosão.

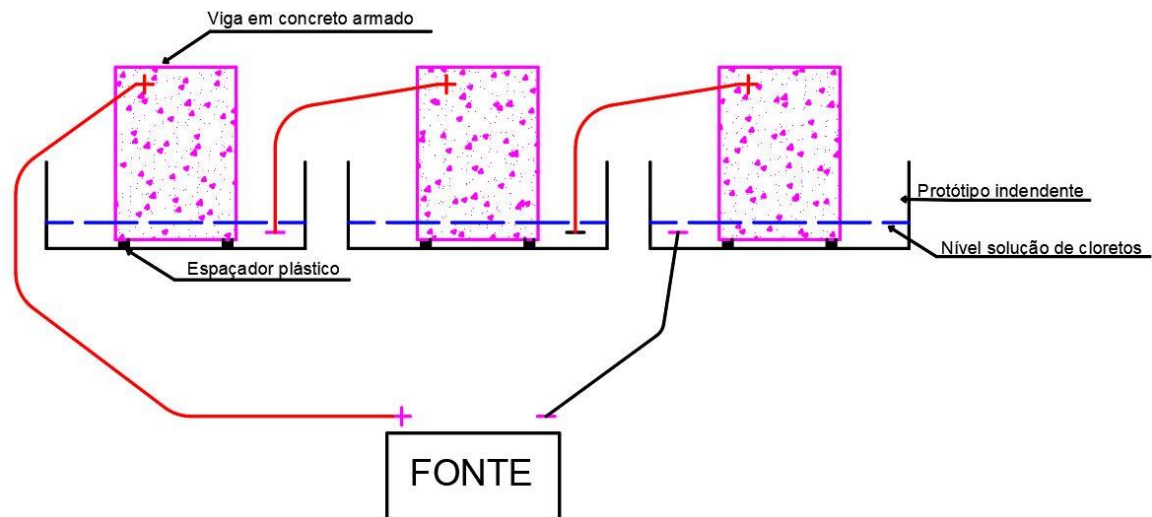
Após a escolha do método, determinou-se que a taxa de corrente constante utilizada seria a mesma dos ensaios de Graeff (2007), correspondente a $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, corrente esta que garante um maior controle sobre o grau de corrosão. A corrente que deve ser aplicada no sistema, depende diretamente do diâmetro das barras, neste caso 8 mm, e do seu comprimento, 96 cm, obtendo-se a corrente constante de aplicação de 250 mA. A solução foi de 35 g/L de cloreto de sódio (NaCl), formando uma solução similar a encontrada no oceano. Nesta etapa determinou-se também o tempo de ensaio necessário, que conforme os estudos de Graeff (2007), para que se atinja 10% de perda de massa, o necessário é aproximadamente 30 dias.

Para a realização do ensaio, foram montados três protótipos independentes de MDF envoltos com plástico resistente. No fundo de cada uma destas piscinas, foram dispostos espaçadores plásticos, garantindo a passagem da solução de cloretos sob as vigas, além de garantir que a lona plástica não se rasgue devido ao atrito com as vigas de concreto.

Após a disposição das três vigas em cada protótipo, os mesmos foram preenchidos com a solução de cloretos até cerca de 5 cm de altura, garantindo que a lâmina da solução ultrapassasse a barra de 8 mm localizada no interior da viga. O fio de cobre, apresentado no capítulo 3.5.2, presente no interior da viga, foi ligado ao polo positivo da fonte, atuando como ânodo do processo eletroquímico. Já o fio de cobre, disposto imerso em torno de cada uma das vigas, foi ligado ao polo negativo da fonte, atuando como cátodo no processo (FIGURA 28). Desta forma, as vigas colocadas em protótipos independentes foram ligadas em série, garantindo que a corrente fosse

contínua e constante nas três vigas e que o processo de corrosão ocorresse de forma igual. A ligação em série permitiu também o uso de uma única fonte.

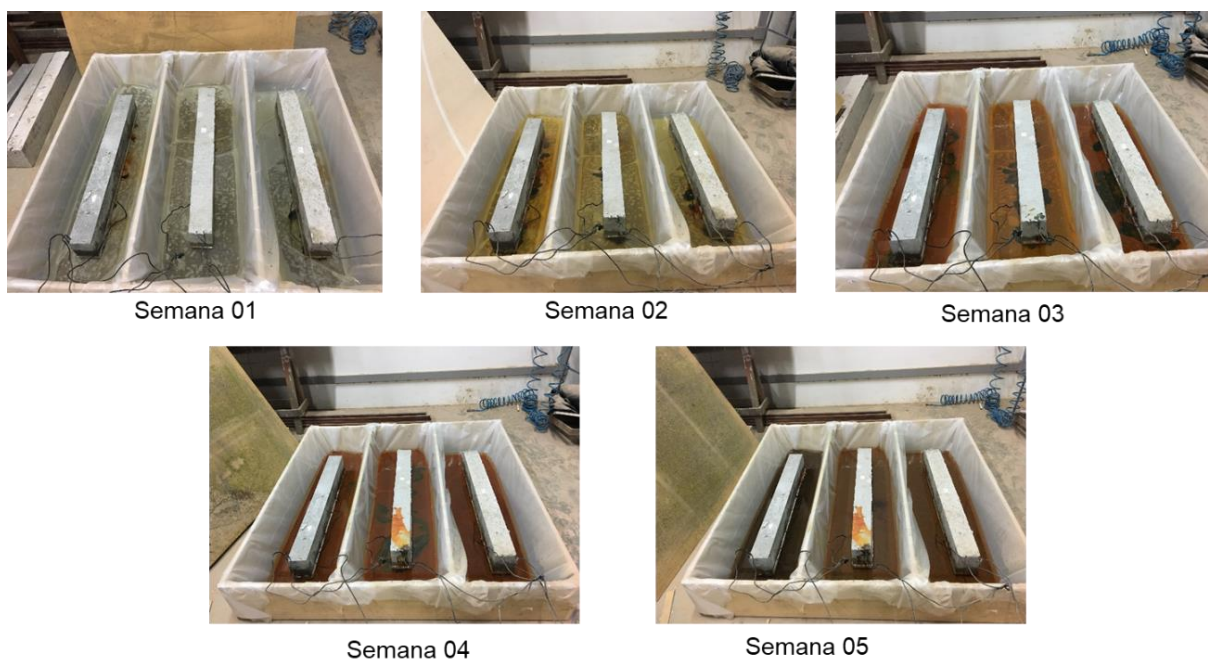
Figura 28 - Esquema de ligação das vigas a fonte



Fonte: Autora (2019).

Acompanhou-se semanalmente o processo de corrosão das vigas, avaliando-se a condição das vigas e a possibilidade de seguir-se com o ensaio. Na Figura 29 é possível visualizar o processo de corrosão nas vigas, desde o dia no qual as vigas foram colocadas nos protótipos até sua retirada.

Figura 29 - Propagação da corrosão nas vigas



Fonte: Autora (2019).

Após o término do ensaio de corrosão, adotou-se a nomenclatura disposta no Quadro 4 para cada uma das vigas.

Quadro 4 - Nomenclatura adotada para as vigas

Denominação	Código
Referência não corroída	REFNC
10% Cinza de casca de arroz não corroída	10CCANC
10% Sílica ativa não corroída	10SANC
Referência corroída	REFC
10% Cinza de casca de arroz corroída	10CCAC
10% Sílica ativa corroída	10SAC

Fonte: Autora (2019).

3.5.7 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de tração na flexão foi realizado nas três vigas submetidas à corrosão e nas três vigas testemunho mantidas em temperatura ambiente, com o objetivo de determinar a deformação máxima das vigas. Para tal ensaio, foram utilizados suportes metálicos adaptados pelo laboratório para a realização do ensaio na prensa de compressão *Emic 200PLUS*, conforme pode ser visualizado na Figura 30.

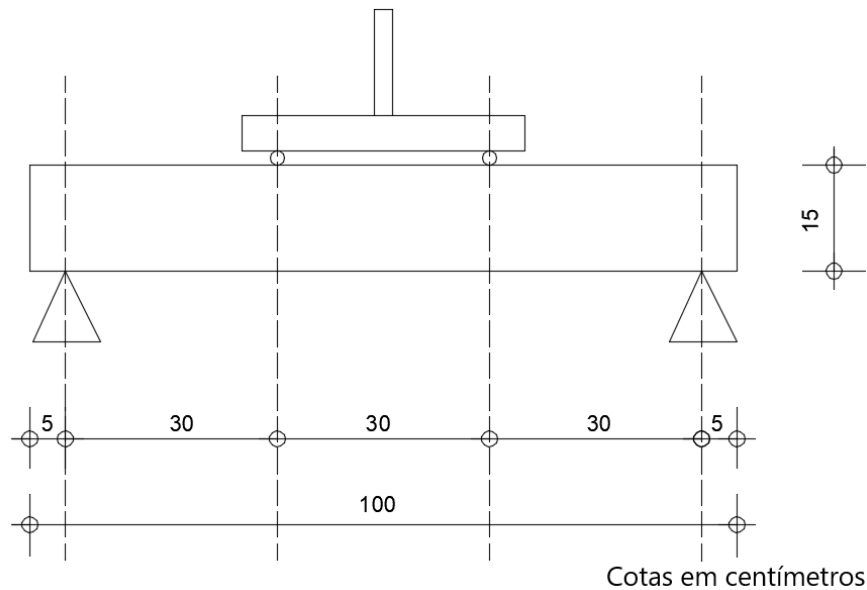
Figura 30 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: Autora (2019).

Conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010), o vão entre os apoios inferiores deve ter dimensão “L” e o vão entre os apoios superiores “L/3”, sendo que a carga deve ser aplicada no terço médio do vão, contendo um anel de aplicação da carga e apoios que permitam o deslocamento do corpo de prova. A Figura 31 apresenta um esquema da realização do ensaio.

Figura 31 - Esquema ensaio de resistência a tração na flexão para as vigas moldadas



Fonte: Adaptado pela Autora com base em Stein (2016).

A resistência à tração na flexão das vigas ensaiadas é calculada conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010), dependendo diretamente da localização da ruptura na viga. Para rupturas localizadas no terço médio do vão, a resistência à tração na flexão é dada pela Equação 5, enquanto para rupturas fora do terço médio, em que a distância deste não seja superior a 5% de l (dimensão entre apoios), a resistência é calculada pela Equação 6.

$$f_{ct, f} = \frac{F.l}{b.d^2} \quad (\text{Equação 5})$$

$$f_{ct, f} = \frac{3.F.a}{b.d^2} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

F: força máxima registrada no ensaio (N);

l: dimensão entre apoios (mm);

b: largura média do corpo de prova (mm);

d: altura média do corpo de prova (mm);

a: distância média entre a linha de ruptura da face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

3.5.8 Análise da fissuração

Com o intuito de analisar a forma de propagação e a espessura das fissuras realizou-se um mapeamento das mesmas com o auxílio de fissurômetro, logo após a finalização do ensaio de tração na flexão. Após, as mesmas foram representadas com o auxílio do software *AutoCAD*. A abertura de cada uma das fissuras foi medida logo após o término do ensaio de tração na flexão, conforme pode ser analisado na Figura 32.

Figura 32 - Mapeamento e análise de fissuração



Fonte: Autora (2019).

3.5.9 Determinação da perda de massa

Após a realização do ensaio de tração na flexão, pode-se determinar a perda de massa de cada uma das vigas submetidas ao ensaio de corrosão. Para tanto,

removeu-se o concreto deteriorado até que a armadura positiva estivesse totalmente exposta, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Armadura corroída



Fonte: Autora (2019).

Para a determinação da perda de massa de cada uma das três vigas submetidas à corrosão, mediu-se o diâmetro das barras positivas que compõe a armadura, antes e depois da realização do ensaio de CAIM com o auxílio de um paquímetro (FIGURA 34). Para tanto foram realizadas 3 medições em cada uma das barras, nas duas extremidades e no centro.

Figura 34 - Diâmetro das barras pós corrosão



Fonte: Autora (2019).

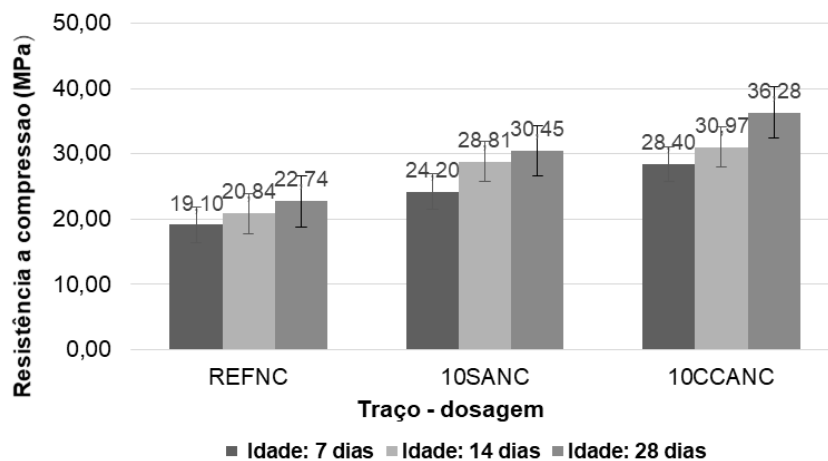
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado endurecido nas vigas de concreto armado submetidas e não submetidas ao processo de corrosão, bem como a avaliação do processo de corrosão.

4.1 Resistência à compressão simples

No Gráfico 3 estão dispostos os resultados de resistência mecânica à compressão simples dos corpos de prova dos traços executados. Este ensaio foi realizado como forma de controle tecnológico do concreto. Os dados apresentados receberam tratamento de espúrio.

Gráfico 3 - Resistência à compressão simples dos corpos de prova de concreto



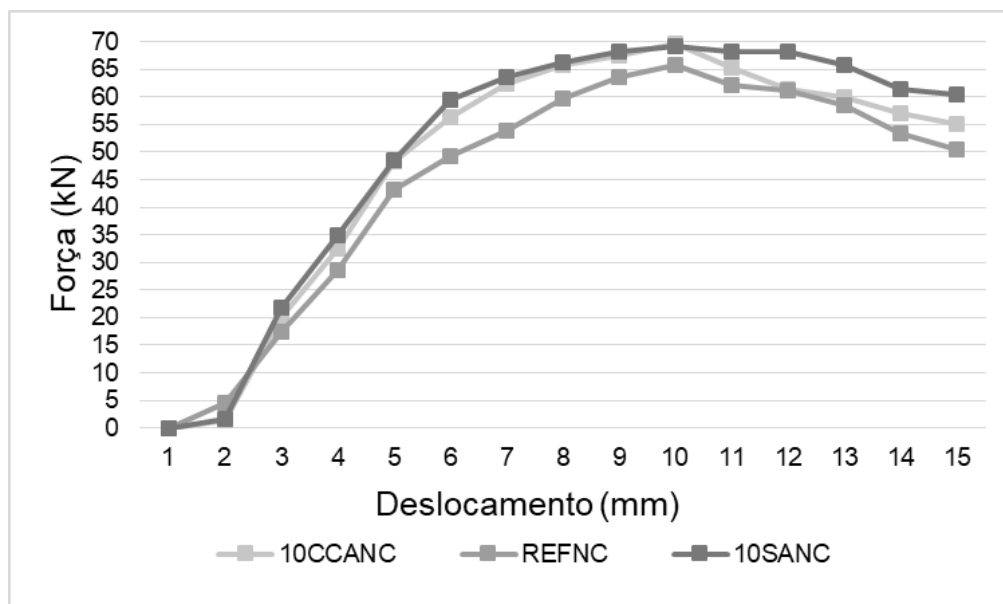
Fonte: Autora (2019).

É possível observar que os traços com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos obtiveram resistências aos 28 dias superiores à obtida pelo traço referência, na ordem de aumento de resistência em 33,90% para sílica ativa e 59,54% para traço com cinza de casca de arroz. O traço com substituição de 10% do cimento por cinza de casca de arroz apresentou resistência superior tanto ao traço referência quando ao traço com substituição do cimento por 10% de sílica ativa, na ordem de 19,15%. Alguns estudos, como Righi (2012), já demonstram que a cinza de casca de arroz vendida comercialmente possui uma reatividade bastante elevada aos 28 dias, pois seu índice pozolânico é 3 vezes superior à exigência da NBR 12653 (ABNT, 2014), que é da ordem de 90%.

4.2 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão de cada uma das seis vigas pode ser analisada nos gráficos a seguir. O Gráfico 4 apresenta as vigas que não sofreram processo de corrosão e o Gráfico 5 as vigas expostas à corrosão.

Gráfico 4 - Resistência à tração na flexão - vigas não expostas à corrosão

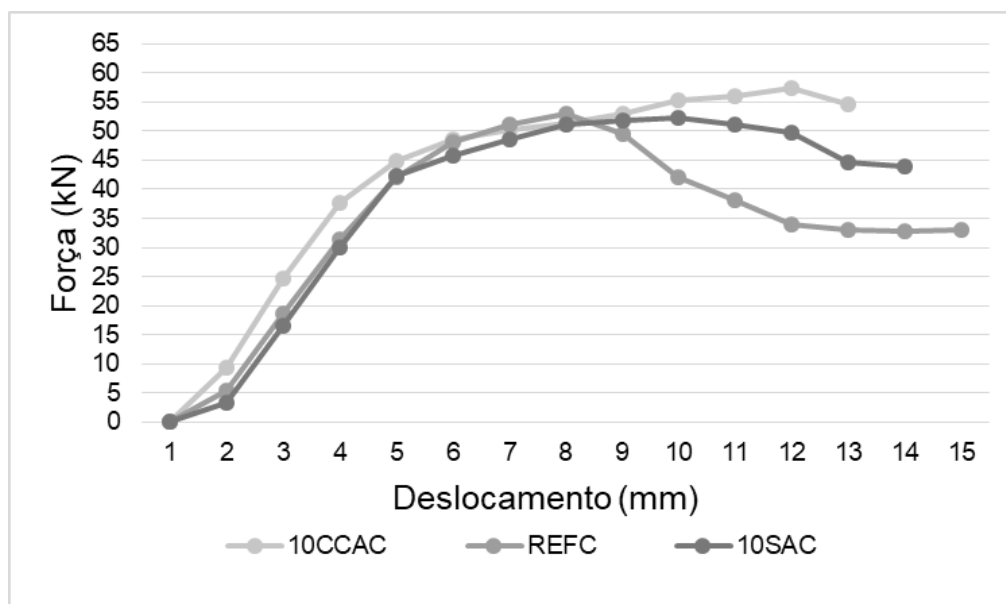


Fonte: Autora (2019).

Com base no Gráfico 4 pode-se analisar um comportamento semelhante para todas as vigas não submetidas à corrosão. Todas as vigas apresentaram a carga

máxima próxima ao deslocamento de 10 mm, tendo um deslocamento máximo de 15 mm. No Gráfico 4 é possível também visualizar o maior ganho de força e a menor redução de força resistida para as vigas com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, enquanto a viga referência apresentou uma maior perda de resistência após o pico de resistência.

Gráfico 5 - Resistência à tração na flexão - vigas expostas à corrosão



Fonte: Autora (2019).

No Gráfico 5 pode ser analisada a curva força x deslocamento para as vigas submetidas ao ensaio de corrosão acelerada. As vigas obtiveram comportamentos distintos quanto ao ganho de resistência e o deslocamento máximo alcançado. A viga referência (REFC) apresentou o pior comportamento dentre as 3 vigas submetidas ao processo corrosivo, apresentando um deslocamento de 7 mm para sua carga máxima e uma redução brusca na resistência após este valor. A viga com sílica ativa (10SAC) apresentou um deslocamento para a carga máxima próximo aos 10 mm, e uma perda de resistência após este ponto de forma mais uniforme quando comparada com as demais vigas. Já a viga com cinza de casca de arroz (10CCAC) apresentou o melhor desempenho, tendo a carga máxima nos 12 mm de deslocamento.

Na Tabela 11 é possível visualizar os resultados de carga máxima de ruptura de cada uma das vigas, bem como o deslocamento máximo (flecha máxima) sofrido por estas durante o ensaio de tração na flexão.

Tabela 11 - Resistência à tração na flexão

Viga/ traço	Carga de Ruptura (MPa)	Flecha máxima (mm)
REFNC	26,28	16,81
REFC	14,10	15,99
10CCANC	27,88	16,94
10CCAC	26,96	17,27
10SANC	27,68	17,51
10SAC	20,92	17,14

Fonte: Autora (2019).

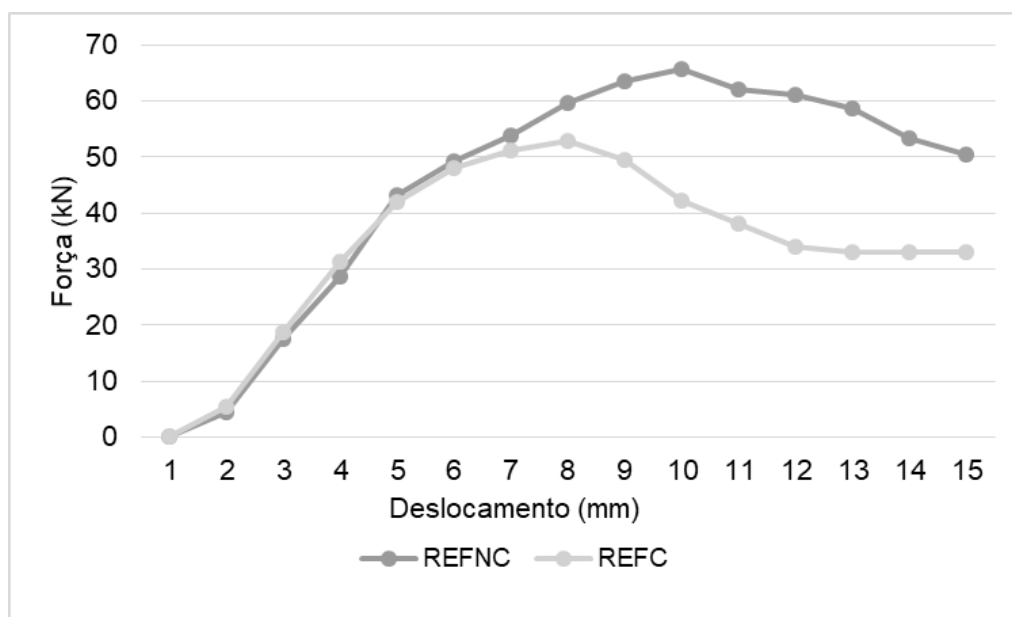
As vigas não corroídas com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, apresentam um aumento de resistência, ao comparar com o traço referência (REFNC). Assim como na resistência à compressão simples, a viga com a cinza de casca de arroz (10CCANC) apresentou resistência superior, tanto ao traço referência quanto ao traço com substituição do cimento por 10% de sílica (10SANC). Ao tratar-se das vigas submetidas ao método CAIM, é possível observar uma menor capacidade de carga, sendo a pior situação de resistência a da viga referência (REFC), que obteve uma redução de resistência na ordem de 46,35%. Para sílica ativa (10SAC) a redução foi de 24,43%, enquanto que para a cinza de casca de arroz (10CCAC) a redução foi de 3,30%. Deste modo é possível perceber um melhor desempenho da viga com substituição do cimento por cinza de casca de arroz. O melhor desempenho desta viga (10CCAC) é dado pela menor perda de massa das barras que compõe a armadura, certificando que o material apresenta características favoráveis à resistência à corrosão. O estudo realizado por Cabrera (2014) já apresentava esta mesma configuração, onde as substituições proporcionavam maiores ganhos de resistência e menores deformações.

Nos Gráficos a seguir (GRÁFICOS 6, 7 e 8), são apresentadas as curvas força x deslocamento de cada um dos três grupos de amostras, sendo analisados separadamente conforme sua resistência e deslocamento.

No Gráfico 6 são apresentadas as curvas força x deslocamento das duas vigas do traço referência (REFC e REFNC). Pode-se observar uma elevada diferença de resistência e deslocamento máximo entre as vigas. As cargas e deslocamentos iniciais resistidos por ambas as vigas apresentam-se de forma semelhante, com resultados próximos. A diferença de comportamento ocorre quando a viga submetida ao

processo corrosivo (REFC) atinge sua carga máxima, passando a perder resistência de forma mais brusca ao comparada com a viga não submetida ao processo de corrosão (REFNC). Assim é possível perceber que a corrosão afetou a resistência da viga, diminuindo sua capacidade de força.

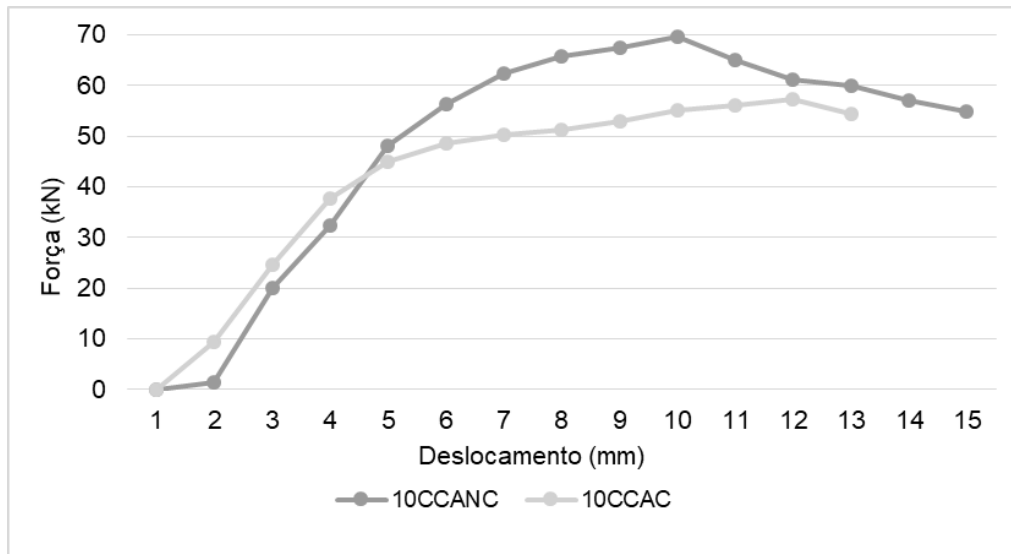
Gráfico 6 - Resistência à tração na flexão - vigas referência



Fonte: Autora (2019).

A curvas força x deslocamento para as vigas com cinza de casca de arroz adicionada ao concreto são apresentadas no Gráfico 7. Através deste, é possível analisar a maior capacidade de carga da viga não submetida ao processo corrosivo (10CCANC), bem como um maior deslocamento máximo. Ambas as vigas apresentam a sua ruptura próxima a deformação de 10 mm. Enquanto a viga não submetida ao processo corrosivo deforma-se até os 15 mm, a viga submetida à corrosão acelerada (10CCAC), tem seu rompimento nos 13 mm. No Gráfico 7 pode-se perceber uma diferença de força máxima menor entre a viga submetida e a viga não submetida à corrosão se comparada com as vigas apresentadas no Gráfico 6. Dentre as vigas ensaiadas, as vigas com cinza de casca de arroz apresentaram um melhor desempenho, apresentando as maiores cargas de ruptura e maiores valores para flecha máxima, ou seja, maiores deformações e menor perda de resistência pós corrosão.

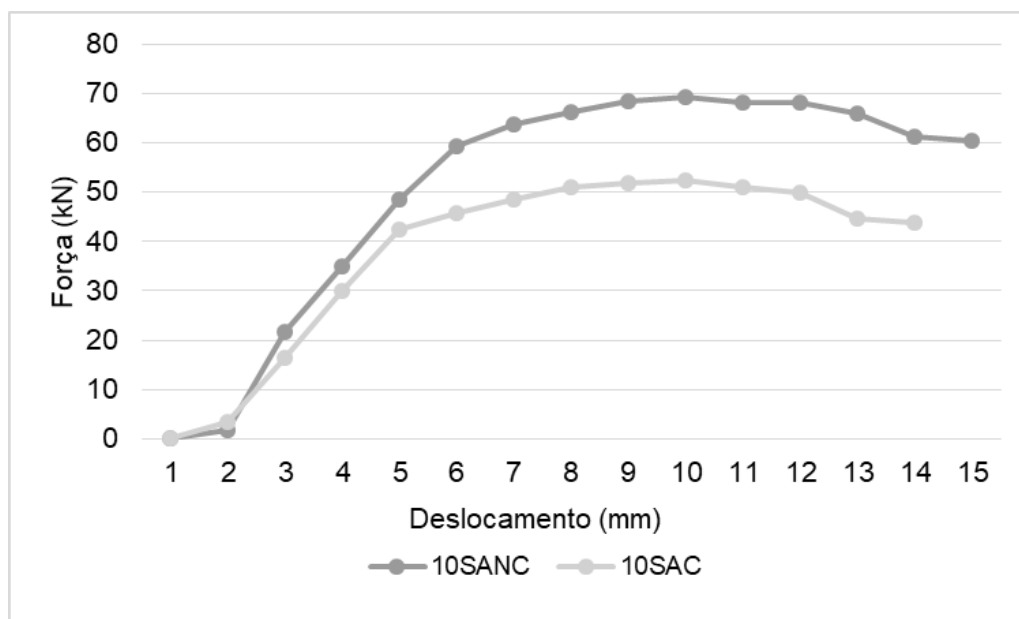
Gráfico 7 - Resistencia à tração na flexão - vigas com cinza de casca de arroz



Fonte: Autora (2019).

O Gráfico 8 apresenta a força e o deslocamento máximo resistido pelas vigas com substituição parcial do cimento por sílica ativa. A viga exposta ao processo corrosivo que simula ambiente marinho (10SAC), obteve resultados inferiores ao da viga não submetida ao processo corrosivo (10SANC). Assim como a viga com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz exposta ao método CAIM, a viga com sílica ativa exposta ao processo corrosivo apresentou menores diferenças de força resistida entre a viga submetida ao método de aceleração da corrosão e a viga mantida em condições ambiente. Dentre as vigas analisadas, aquelas com substituição parcial do cimento por sílica ativa apresentaram um comportamento de suporte de carga e forma de progressão do deslocamento semelhante para a viga submetida e a viga não submetida à corrosão, como pode ser analisado no Gráfico 8 diferindo-se dos demais traços, que apresentaram diferenças de ganho de resistência e deslocamento.

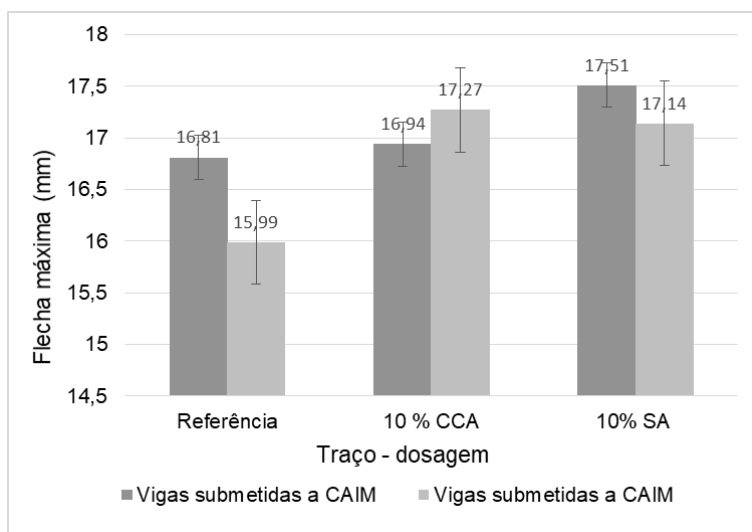
Gráfico 8 - Resistência à tração na flexão - vigas com sílica ativa



Fonte: Autora (2019).

O Gráfico 9, a seguir, baseia-se nos dados expostos na Tabela 14, apresentando a diferença de flecha máxima alcançada para cada uma das seis vigas ensaiadas a tração na flexão. Desta forma, por meio deste percebe-se, conforme o esperado, uma maior deformação aliada ao maior suporte de carga nas vigas não submetidas ao processo de corrosão, este mesmo comportamento foi analisado por Cabrera (2014). As vigas submetidas à corrosão apresentaram uma redução na capacidade de suporte à deformação, aliada ainda a menores resistências, sendo que o pior caso, assim como na resistência à compressão simples e na carga máxima suportada na resistência à tração na flexão, foi o da viga referência que sofreu uma redução de flecha de cerca de 5%, já para a viga com sílica ativa acrescida à massa cimentícia, a redução foi próxima a 2%. Este fato pode ser decorrência da corrosão provocada nas armaduras, tornando as vigas mais frágeis. Para as vigas com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, pode-se perceber um aumento na deformação de cerca de 2% na viga submetida à corrosão para a viga não submetida ao processo. Acredita-se que o fato ocorreu pela maior resistência à corrosão desta viga, aliada a menor perda de massa das barras componentes da armadura.

Gráfico 9 – Flecha máxima



Fonte: Autora (2019).

No estudo realizado por Cabrera (2014), os resultados encontraram-se próximos aos encontrados no presente trabalho. As vigas que não sofreram corrosão apresentaram maiores resistências à ruptura e flechas máximas menores, ao comparadas com as vigas submetidas à corrosão. Uma explicação para este fato é dado pelas pozolanas conferirem ao concreto características como a redução do diâmetro dos poros da pasta hidratada, o que proporciona a redução do ataque ao concreto por materiais externos. Dentre estes, as vigas com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz apresentaram resistências elevadas, menores valores de flecha máxima e menores perdas de massa da armadura. Acredita-se que estas vigas atingiram maiores valores de resistência devido à cinza de casca de arroz ser um material rico em sílica, que possibilita maiores ganhos de resistência e durabilidade em concretos. Os trabalhos realizados por Tashima (2006) e por Tashima et al. (2015), já apresentavam comportamento semelhante, no qual a adição de cinza de casca de arroz promoveu grandes ganhos de resistência em relação ao traço referência realizado por este.

4.3 Análise de fissuração

Durante o ensaio de tração na flexão realizou-se o mapeamento das fissuras dispostas nas vigas de concreto armado. Na maioria dos casos verificou-se que as vigas romperam no terço médio do vão, ou seja, tiveram sua ruptura na flexão.

As vigas de concreto armado não submetidas à corrosão acelerada apresentaram uma configuração de fissuração semelhante, como pode ser analisado nas figuras a seguir. Já para as vigas submetidas ao processo de corrosão acelerada, a fissuração apresentou comportamento semelhante apenas para as vigas com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, as quais obtiveram ruptura na flexão, diferentemente da viga referência que teve sua ruptura ao cisalhamento. As Figuras 35 a 40 apresentam a fissuração das vigas de concreto armado não submetidas à corrosão acelerada e das vigas submetidas ao processo corrosivo.

As vigas sem substituição parcial do cimento apresentaram um comportamento diferente entre si. Na viga referência não submetida à corrosão acelerada, pode-se perceber um elevado número de fissuras de espessura elevada. Já para a viga submetida ao processo de corrosão percebe-se uma redução no número de fissuras, porém um rompimento diferente das cinco vigas anteriores, apresentando características de ruptura ao cisalhamento. Acredita-se que o rompimento da viga ao cisalhamento esteja associado à perda de massa da armadura transversal. Com base no exposto acima, a Figura 35 apresenta a viga não submetida à corrosão, e a Figura 36 a viga submetida ao processo corrosivo.

Figura 35 - Fissuração viga REFNC



Fonte: Autora (2019).

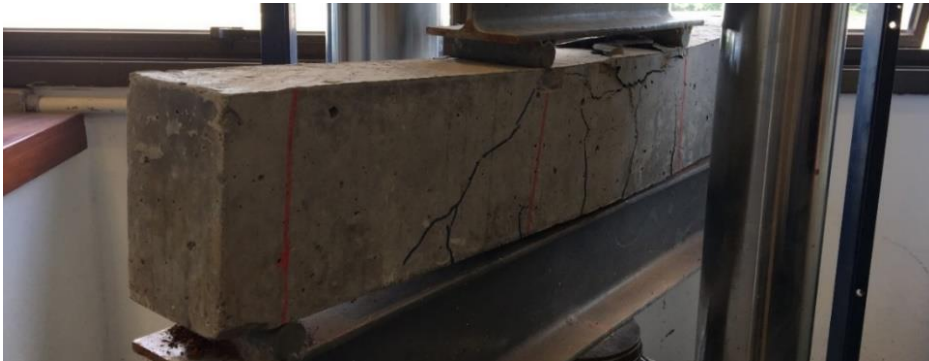
Figura 36 - Fissuração viga REFC



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 37 é apresentada a viga com substituição do cimento por 10% de cinza de casca de arroz não submetida à corrosão, enquanto na Figura 38 pode ser verificada a viga submetida ao processo de corrosão, a qual apresenta maior número de fissuras ao ser comparada com a anterior.

Figura 37 – Fissuração viga 10CCANC



Fonte: Autora (2019).

Figura 38 - Fissuração viga 10CCAC



Fonte: Autora (2019).

Nas Figuras 39 e 40 são apresentadas as vigas com substituição parcial do cimento por sílica ativa. A Figura 39 representa a viga não submetida à corrosão, enquanto a Figura 40 refere-se à viga submetida ao método CAIM. Pode-se perceber um comportamento semelhante ao apresentado pelas vigas com substituição parcial por cinza de casca de arroz, no qual as fissuras após a corrosão apresentaram-se em maior número e espessura.

Figura 39 - Fissuração viga 10SANC



Fonte: Autora (2019).

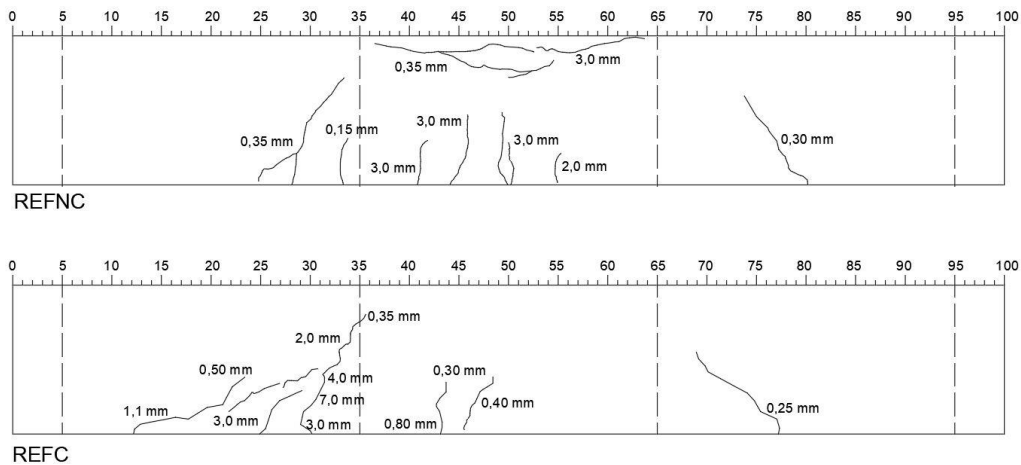
Figura 40 - Fissuração viga 10SAC



Fonte: Autora (2019).

A Figura 41 ilustra o mapeamento de fissuras para a viga referência não submetida ao processo de corrosão (REFNC), e para a viga submetida ao processo (REFC). Avaliando a forma de propagação das fissuras em ambas é possível perceber duas formas distintas de rompimento: enquanto a viga não corroída apresentou seu rompimento a flexão, a viga corroída possui características de rompimento ao cisalhamento. Acredita-se que o mesmo ocorreu devido à perda de massa dos estribos presentes no interior do concreto, acarretando também no maior número de fissuras de maior espessura. Desta forma, pode-se perceber que o processo de corrosão causou elevados danos à armadura que compõe a viga.

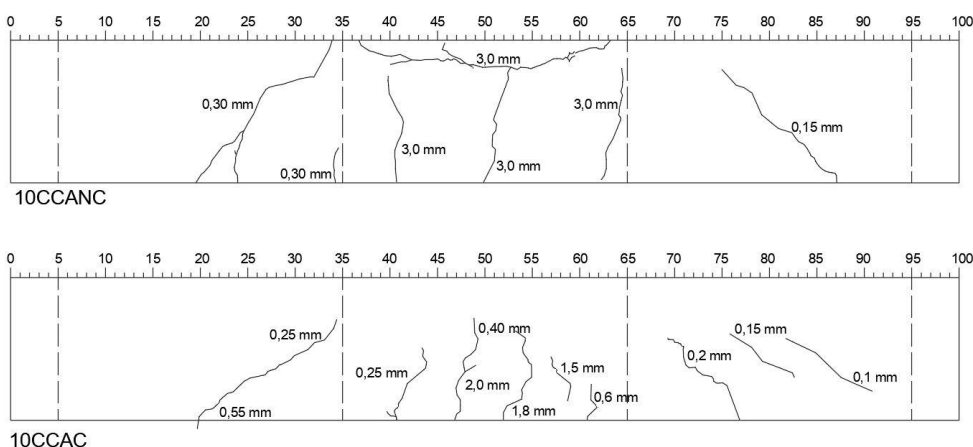
Figura 41 - Mapeamento de fissuração vigas referência



Fonte: Autora (2019).

A Figura 42 demonstra o mapeamento de fissuração das vigas com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, não submetidas (10CCANC) e submetidas (10CCA) ao processo corrosivo. Pode-se perceber que para ambas as situações o rompimento deu-se no terço médio do vão, caracterizando rompimento a flexão. O aumento de fissuração na viga submetida ao processo de corrosão pode ser explicado devido à redução da resistência provocada pela exposição ao método CAIM. Em contra partida percebe-se o aumento da espessura das fissuras no cisalhamento, estando atrelado à perda de massa da armadura transversal. Porém, dentre as vigas submetidas e não submetidas, as contendo cinza de casca de arroz apresentaram fissuração de menor espessura, aliada a maior resistência, comprovando o ganho de resistência característico das adições pozolânicas em concreto armado.

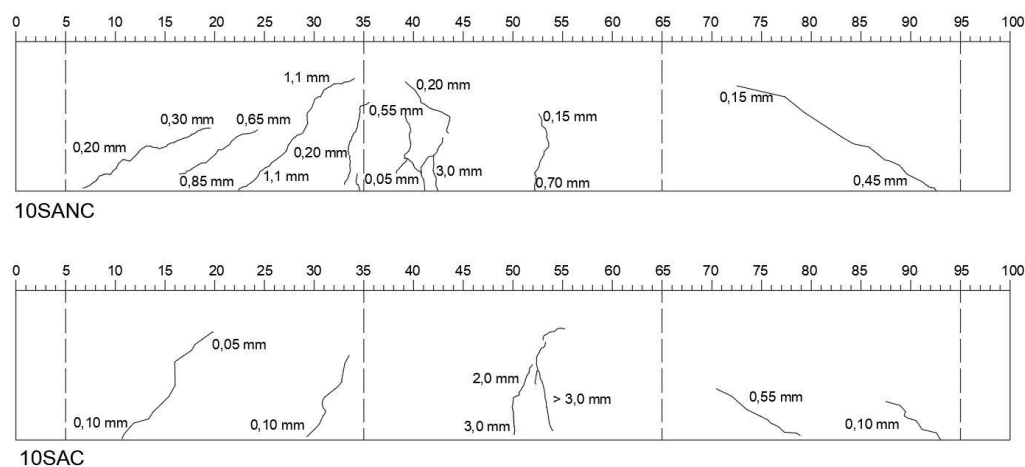
Figura 42- Mapeamento fissuração viga com adição de cinza de casca de arroz



Fonte: Autora (2019).

O mapeamento de fissura da viga com adição de sílica ativa, tanto para a viga submetida à corrosão acelerada (10SAC), quanto para a viga mantida em condições ambiente (10SANC) é indicado na Figura 43. A configuração da fissuração e do rompimento destas vigas apresenta-se semelhante à viga com substituição parcial por cinza de casca de arroz, tendo rompimento no terço médio do vão e fissuras características de rompimento a tração. As fissuras de cisalhamento desta viga apresentaram menor quantidade, contudo apresentam maiores espessuras.

Figura 43 - Mapeamento fissuração viga com adição de sílica ativa



Fonte: Autora (2019).

4.4 Perda de massa

Com base nas medições do diâmetro das barras da armadura positiva das vigas submetidas à corrosão acelerada por imersão modificada e posteriormente a tração na flexão, é possível verificar uma diminuição no diâmetro das mesmas, confirmando a ocorrência de perda de massa das barras. A viga referência apresentou a maior diferença de diâmetro dentre as 6 barras analisadas (2 de cada viga), apresentando uma redução de cerca de 0,50 mm. Dentre as vigas com materiais pozolânicos incorporados à massa cimentícia, a viga com sílica ativa apresentou uma redução no diâmetro de cerca de 0,13 mm, enquanto a viga com cinza de casca de arroz apresentou as menores diferenças entre diâmetro inicial e diâmetro pós corrosão, reduzindo cerca de 0,12 mm, o que explica a maior resistência destas vigas, uma vez que as barras deste traço sofreram menos efeitos da corrosão.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões sobre o comportamento das vigas de concreto armado com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos submetidas a corrosão acelerada. Serão apresentadas também sugestões para trabalhos futuros.

A caracterização física dos materiais incorporados à massa cimentícia (cimento, areia, brita, cinza de casca de arroz e sílica ativa), mostrou a conformidade com as normas vigentes, comprovando também os dados disponibilizados pelos fornecedores de cada um destes materiais.

A incorporação dos materiais pozolânicos, sílica ativa e da cinza de casca de arroz, ao concreto trouxe resultados positivos em questões de resistência e deterioração das vigas de concreto armado, percebendo-se que ambas são alternativas viáveis como forma de conter processos corrosivos. O traço com substituição de 10% de cinza de casca de arroz demonstrou um melhor desempenho, sendo um indicativo de maior durabilidade.

O método utilizado para corrosão mostrou-se eficaz, provocando corrosão nas vigas de concreto armado e perda de massa nas barras que integravam a armadura das mesmas.

As substituições conferiram às vigas de concreto armado maiores resistências tanto para as três vigas expostas ao meio corrosivo quanto para as vigas mantidas

em condições ambiente. Desta forma, através do ensaio de resistência à tração na flexão verificou-se que as vigas com adição de materiais pozolânicos tiveram melhor desempenho e ruptura semelhante às vigas não submetidas, enquanto a viga que não continha no seu traço estes materiais apresentou, além de uma resistência consideravelmente inferior ao comparada com as outras cinco vigas, ruptura ao cisalhamento, característica de falha nos estribos que compõe a armadura. Assim, é possível afirmar que a corrosão exerceu influência na resistência desta viga, bem como os materiais pozolânicos, neste caso especialmente a cinza de casca de arroz, promovem uma maior resistência ao processo corrosivo.

Através do mapeamento das fissuras foi possível estabelecer que as vigas com adições pozolânicas na massa cimentícia apresentaram fissuras de menor espessura, localizadas principalmente no terço médio do vão, onde ocorreu o rompimento das mesmas. Nas vigas submetidas à corrosão, as fissuras com maior espessura apresentaram-se também distribuídas fora do terço médio do vão (fissuras de cisalhamento). A viga submetida à corrosão que não incluía materiais pozolânicos em sua composição apresentou fissuras maiores que 3,0 mm, dispostas fora do terço médio do vão, devido ao comprometimento da armadura transversal da viga.

Desta forma, tem-se como conclusão geral que os ensaios realizados ao longo deste trabalho mostram que as vigas com substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos expostas à corrosão acelerada por imersão modificada apresentam um melhor desempenho mecânico que a viga referência. A substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz apresentou, dentre os três traços realizados, a melhor alternativa de substituição pozolânica para vigas expostas a corrosão, apresentando além da melhor resistência mecânica e menor índice de fissuração e menor perda de massa da armadura transversal.

Para trabalhos futuros, sugere-se a comparação de traços distintos das adições pozolânicas utilizadas neste trabalho, com o intuito de avaliar possibilidades de maiores ganhos de resistência. Sugere-se também, a realização do reparo das vigas submetidas à corrosão, avaliando assim a capacidade de realização de reparos em estruturas submetidas a frentes corrosivas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM – ABESC. **Concretos especiais maximizando o desempenho**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/2015061-Concretos-especiais-maximizando-o-desempenho.html>> Acesso em 12 set. 2018.

ALBUQUERQUE, Rayse Thaynare Oliveira; LIMA, Nelson Luiz de Andrade. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida**. Rio de Janeiro, p. 57, dez 2014. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/361059833/Adicoes-Minerais-Ao-Concreto-Melhores-Propriedades-Maior>> Acesso em: out. 2018.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique L. **Materiais de Construção. Normas, especificações, aplicações e ensaios de laboratório**. 1ª ed. Editora PINI: São Paulo, 2012.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. **Patologia das Estruturas**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM ISO 3310-1:** Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 12142:** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 13956-1:** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 15575:** Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 15900 -1:** Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BATTISTI, Fernando. **Recuperação de vigas em concreto armado utilizando polímero reforçado com fibras de carbono.** Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2017.

CABRERA, Leonardo Sena. **Vigas de concreto armado submetidas a corrosão acelerada:** avaliação do comportamento mecânico de argamassa de reparo com diferentes materiais pozolânicos. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2014.

CABRAL, Eduardo B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate a iniciação e a propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2000.

CASUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1ª ed. Goiânia: Editora UFG, 1997.

CLIFTON, James R. **Predicting the Service Life of Concrete**. ACI Materials Journal, 1993.

COMIM, Kevin; ESTACECHEN, Tatiana. Causas e alternativas de reparo da corrosão em armaduras para concreto armado. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 9, Ed. Especial de Patologia, p. 36, jul. 2017. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/construindo/article/view/4550>> Acesso em: set. 2018.

CAMPAGNOLO, João; DAL MOLIN, Denize.; VAZKE, Nei Ricardo. Aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto. **Revista Ambiente Construído**. Vol 8. Porto Alegre, 2008.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS Porto Alegre, 1988.

FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – FIB. *Model Code for Service Life Design*. Lausanne, 2006.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 4ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2003.

GUEDERT, L.O. **Estudo da Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção e sistemas), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1989.

GRAEFF, Ângela G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2007.

HELENE, Paulo R. Do Lago. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, Red Rehabilitar, 2003.

_____. **Corrosão em armadura para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.

_____. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

LIMA, Maryangela Geimba de. **Ação do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005.

MEDEIROS, Marcelo; ANDRADE, Jairo; HELENE, Paulo. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, Paulo. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MAILVAGANAM. N. P.; DEANS, J. J. **Materials, selection, and handling: repair and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press, 1992.

MORENO, Junior A.L; ROQUE, J.L. **Considerações sobre vida útil do concreto**. In: 1º Encontro Nacional de Pesquisa, projeto, produção em concreto pré-moldado. São Carlos: 2005.

MOTA, J.M.F; BARBOSA, F.R.; COSTA e SILVA, A.J.; FRANCO, A.P.G.; CARVALHO, J.R. Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto. In: 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais IBRACON**, Maceió, 2012.

NEPOMUCENO, Antonio Alberto. **Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M. , **Propriedades do Concreto**. 2ª Edição. São Paulo: PINI, 1997.

_____. Consideration of durability of concrete structures: past, present and future. **Revisit Material and Structures**, Volume 34, mar. 2001.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13ª ed.. São Paulo: Ed. Globo, 1998.

POGGIALI, Flávia. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. Monografia (Especialização em Construção Civil), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2009.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da cinza de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2006.

POLITO, G., et al. Análise microestrutural da interface entre argamassas de revestimento sobre blocos cerâmicos. **Anais 50º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo-SP: IBRACON, 2008.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil das estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

RIGHI, D. P. **Caracterização de Argamassas à base de cimento Portland e Cinza de Casca de Arroz oriunda da queima com e sem controle de temperatura**. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA. Alegrete, 2012.

RIGHI, D. P. **Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibra de polipropileno e**

cinza de casca de arroz. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a indicação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

SANTOS, Maurício. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso.** Monografia (Especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2012.

SOARES, Athur; VASCONCELOS, Livia; NASCIMENTO, Felipe. **Corrosão em armaduras de concreto.** Cadernos de graduação – Ciências exatas e Tecnologias. Maceió, 2015.

STEIN, Kássio J. **Avaliação experimental dos efeitos combinados de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado.** Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2016.

TASHIMA M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, 2006.

TASHIMA M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L.; BARBOSA, M. B. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Matéria**, n 1, Rio de Janeiro 2015.

TORRES, Ariela. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM- Corrosão por Acelerada por Imersão Modificada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2006.

TUUTTI, K. **Corrosin of Steel in Concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09