



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO ACOPLAMENTO CORROSÃO-  
FISSURAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

**SAMANTA ANDRIZE KLERING**

Foz do Iguaçu  
2020

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO ACOPLAMENTO CORROSÃO-  
FISSURAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

**SAMANTA ANDRIZE KLERING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Julio Flórez-López  
Co-Orientador: Eng. Esp. Thiago Augusto Bertuzzo

SAMANTA ANDRIZE KLERING

## **ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO ACOPLAMENTO CORROSÃO- FISSURAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Julio Flórez-López  
UNILA

---

Co-Orientador: Eng. Esp. Thiago Augusto Bertuzzo  
UNILA

---

Prof. Dr. Ricardo A. Picón  
UCT

---

Prof. Dr. César Winter de Mello  
UNILA

Foz do Iguaçu, 18 de Dezembro de 2020.

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): SAMANTA ANDRIZE KLERING

Curso: ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

	Tipo de Documento
( X ) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	( X ) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: ANÁLISE TEÓRICO EXPERIMENTAL DO ACOPLAMENTO CORROÇÃO-FISSURAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO.

Nome do orientador(a): PROF. DR. JULIO FLÓREZ-LÓPEZ

Data da Defesa: 18/12/202

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, 18 de Dezembro de 2020.

  
Assinatura do Responsável

Aos meus pais e minha irmã, pilares do meu  
crescimento e fundamentais na  
concretização desse sonho.

KLERING, Samanta Andrize. **Análise Teórico Experimental do Acoplamento Corrosão-Fissuração em Vigas de Concreto Armado**. 2020. 64. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## RESUMO

O processo corrosivo não é um problema recente, no entanto, ainda assim nos dias atuais se apresenta como um dos problemas mais frequentes nas estruturas de concreto armado, seja por inconvenientes na execução, alta relação água /cimento ou até pela negligência em fase de projeto da consideração de um revestimento adequado. Logo, a determinação prévia da evolução da corrosão ao longo do tempo se apresenta como uma ferramenta aliada na redução de custos com manutenção e/ou reparos. Neste contexto, com o desenvolvimento do presente trabalho, buscou-se identificar experimentalmente, a influência da evolução da corrosão por íons cloreto no avanço da degradação dos elementos de concreto armado. Para tal, definiu-se um processo de aceleração da corrosão por meio da aspersão de NaCl, simulando assim, o efeito de molhagem/secagem. Simultaneamente, as vigas estiveram sob solicitação mecânica, e a medida em que o experimento avançou foram avaliadas as deflexões, fissurações e o potencial de corrosão nas armaduras. Posteriormente, combinou-se a análise experimental com modelos termodinâmicos baseados na Teoria do Dano Concentrado para simular e, posteriormente, analisar a estrutura de concreto armado sujeita à ação química além das solicitações mecânicas. Constatou-se que todas as vigas submetidas à aspersão de cloretos apresentaram probabilidade superior a 90% de estarem sob corrosão e os maiores valores de potencial de corrosão estão concentrados na região central da viga, o que indicou que as solicitações mecânicas estão ligadas diretamente com a intensidade da evolução da corrosão. Ademais, a presença de corrosão incrementou os valores de dano e rotações plásticas nas vigas, e esse aumento por sua vez, contribuiu no avanço das taxas de corrosão, resultados esses que refletiram nas penalizações dos momentos.

**Palavras-chave:** Concreto Armado. Corrosão. Cloretos. Mecânica do Dano. Acoplamento Corrosão-Fissuração.

KLERING, Samanta Andrize. **Theoretical-Experimental Analysis of Corrosion-Cracking Coupling in Reinforced Concrete Beams.** 2020. 64. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## ABSTRACT

The corrosive process is not a recent problem, however, even nowadays it presents itself as one of the most common problems in reinforced concrete structures, whether by execution inconveniences, high relation water/cement or even by the negligence in the project stage of consideration of an adequate covering. Therefore, the previous determination of the evolution of corrosion along time shows itself as an allied tool in the reduction of costs with maintenance and/or repairs. In this context, with the development of the present work, we tried to identify experimentally, the influence of the evolution of corrosion by chloride ions in the advance of the degradation of the reinforced concrete elements. To this end, a process of acceleration of the corrosion was used by spraying NaCl, simulating the effect of wetting/drying. Simultaneously, the beams were by mechanic solicitation, so as the experiment advanced the deflections, cracking and the corrosion potential in the rebars were evaluated. Later, the experimental analysis was combined with thermodynamic models based on the Lumped Damage Mechanics to simulate and, later, to analyze reinforced concrete structures that are subject to chemical action in addition to mechanical stresses. It was found that all beams subjected to the spraying of chlorides showed a probability greater than 90% of being under corrosion and the highest values of corrosion potential are concentrated in the central region of the beam, which indicates that the mechanical solicitation are directly linked with the intensity of corrosion evolution. In addition, the presence of corrosion increased the values of damage and plastic rotations in the beams, and this increase in turn, contributed to the increase in corrosion rates, results that reflected in the penalization of bending moments.

**Key words:** Reinforced Concrete. Corrosion. Chlorides. Damage Mechanics. Corrosion-Cracking Coupling.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Descrição esquemática do processo de deterioração do concreto. ....	15
<b>Figura 2</b> – Processo de início da corrosão.....	16
<b>Figura 3</b> – Processo de corrosão por pite numa seção transversal de concreto armado.....	17
<b>Figura 4</b> – Efeitos da Corrosão.....	18
<b>Figura 5</b> – Deslocamentos generalizados num nó, e tensões e deformações generalizadas num segmento de viga.....	22
<b>Figura 6</b> – Esquema do processo de análise pelo modelo de dano concentrado.....	23
<b>Figura 7</b> – a) Elemento estrutural com junta pilar viga. b) Representação simplificada.....	27
<b>Figura 8</b> – Variáveis internas localizadas nas rótulas inelásticas. ....	29
<b>Figura 9</b> – Esquema da Metodologia do trabalho. ....	33
<b>Figura 10</b> – Fôrmas utilizadas para a concretagem.....	34
<b>Figura 11</b> – Materiais devidamente pesados. ....	35
<b>Figura 12</b> – a) Moldagem das vigas. b) Vigas após o desbaste. ....	35
<b>Figura 13</b> – a) Esquema das Vigas projetadas (dimensões em centímetros). b) Viga Finalizada.....	36
<b>Figura 14</b> – CPs submetidos a compressão axial para determinação de: a) Resistência à compressão. b) Módulo de elasticidade estático. ....	36
<b>Figura 15</b> – a) Secagem dos CP's em estufa. b) Absorção de água. c) Pesagem final. d) Rompimento à compressão diametral. ....	37
<b>Figura 16</b> – a) Sistema para acoplamento da carga. b) Conjunto completo (com o ensaio em andamento). c) Sistema de medição (da esquerda para a direita LVDT e relógio comparador digital). d) Cargas. e) Apoio de primeiro e segundo gênero, respectivamente. ....	39
<b>Figura 17</b> – a) Régua fixa. b) Régua apoiada.....	39
<b>Figura 18</b> – a) 41,15kgf. b) 69,55kgf. c) 113,54kgf. ....	40
<b>Figura 19</b> – a) NaCl. b) Água. c) Aspersão da solução na viga. ....	41
<b>Figura 20</b> – a) Eletrodo de cobre/sulfato de cobre. b) Multímetro.....	41
<b>Figura 21</b> – Pontos de Medição de Potencial de Corrosão. ....	41
<b>Figura 22</b> – Disposição das vigas.....	42

<b>Figura 23</b> – Resistência à Compressão em função da idade. ....	43
<b>Figura 24</b> – Gráfico que relaciona o processo de carga/descarga com os deslocamentos .....	45
<b>Figura 25</b> – Momento <i>versus</i> Dano. ....	46
<b>Figura 26</b> – Rotação Plástica <i>versus</i> Dano.....	46
<b>Figura 27</b> – Momento <i>versus</i> Rotação Plástica. ....	46
<b>Figura 28</b> – a) Umidade aparente sob a manta geotêxtil. b) Umidade remanescente. ....	48
<b>Figura 29</b> – Deslocamentos das vigas com e sem corrosão. ....	48
<b>Figura 30</b> – Leituras de Potencial de Corrosão. a) Viga menos carregada. b) Viga intermediária. c) Viga mais solicitada. ....	49
<b>Figura 31</b> – Deslocamentos das vigas com e sem corrosão. ....	51
<b>Figura 32</b> – Deslocamentos das vigas com e sem corrosão. ....	51
<b>Figura 33</b> – Variação dos deslocamentos entre vigas com e sem corrosão. ....	52
<b>Figura 34</b> – Deslocamentos ao longo do tempo das vigas sem corrosão. ....	53
<b>Figura 35</b> – Deslocamentos ao longo do tempo das vigas com corrosão. ....	54
<b>Figura 36</b> – Evolução do Dano. ....	55
<b>Figura 37</b> – Evolução da Rotação Plástica.....	55
<b>Figura 38</b> – Penalização dos Momentos com a evolução da corrosão (vc1).....	56
<b>Figura 39</b> – Penalização dos momentos com a evolução da corrosão (vc2).....	56
<b>Figura 40</b> – Penalização dos Momentos com a evolução da corrosão (vc3).....	57
<b>Figura 41</b> – Porcentagem de Penalização dos Momentos. ....	58

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Probabilidade de Corrosão em Função do Potencial de Corrosão.....	19
<b>Tabela 2</b> – Distribuição dos CPs por Ensaios. ....	43
<b>Tabela 3</b> – Módulo de Elasticidade Estático.....	44
<b>Tabela 4</b> – Absorção de Água por Capilaridade.....	44
<b>Tabela 5</b> – Momentos Característicos.....	45
<b>Tabela 6</b> – Resumo das Vigas Ensaçadas.....	47
<b>Tabela 7</b> – Resultados obtidos por meio de processo iterativo. ....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área da seção transversal
$A_0$	Área de aço inicial
$A_{ef}$	Área efetiva de aço após corrosão
$cor, c_i, c_j$	Nível de corrosão ou nível de corrosão nos nós
$d, d_i, d_j$	Dano ou nível de dano nos nós
$E_c$	Módulo de Elasticidade do concreto
$f$	Função de escoamento
$f_{ck}$	Resistência à compressão característica do concreto
$G$	Taxa de liberação de energia
$G_{b_b}$	Energia livre de Gibbs
$h$	Coefficiente de encruamento cinemático
$i_{cor}$	Taxa de corrosão
$I$	Momento de inércia
$I(D, C)$	Função que representa a resistência à fissuração no potencial termodinâmico
$k_0$	Momento plástico efetivo
$L_b$	Comprimento do elemento b
$m_i$ e $m_j$	Momento interno nos nós $i$ e $j$
$M_{cr}$	Momento crítico
$M_p$	Momento plástico
$M_u$	Momento último
$n$	Força axial interna na barra
$P_u, P_w$ e $M_n$	Forças externas nos eixos x e y, e momento externo aplicado
$\bar{p}$	Média das profundidades de pite
$q, q(c_i), q(c_j)$	Parâmetro de incremento da resistência do concreto devido a presença da armadura
$Q_{corr}$	Quantidade de corrosão
$R_0$	Resistência à fissuração inicial
$Rel$	Relação entre a profundidade máxima e a profundidade média do pite
$w, w^p$	Deslocamento e deslocamento plástico

### Letras Gregas

$\alpha_b$	Ângulo entre eixo local e eixo global
$\alpha_f$	Coefficiente de fluência da NBR 6118 (2014)

$\delta$	Elongação ou encurtamento da barra
$\theta_n$	Rotação
$\xi'$	Coeficiente de fluência em função do tempo
$\xi$	Constante experimental que relaciona a propagação do dano com a evolução da corrosão
$\rho'$	Coeficiente relacionado com a armadura de compressão
$\phi_i$ e $\phi_j$	Rotações nos nós $i$ e $j$
$\bar{\phi}$	Média dos diâmetros das barras da seção transversal

### Matrizes e Vetores

$[B]_b$	Matriz de transformação cinemática da barra $b$
$\{C\}$	Vetor de níveis de corrosão
$\{D\}$	Vetor de níveis de dano
$[F(D)]$	Matriz de flexibilidade de um elemento com dano
$[H(D, C)]$	Matriz de encruamento cinemático com dano e corrosão
$\{M\}$	Vetor das tensões generalizadas
$\{O\}$	Vetor da lei que unifica as funções de corrosão
$\{P\}$	Vetor de forças externas
$\{U\}$	Vetor de deslocamentos
$\{Y\}$	Vetor de forças termodinâmicas associadas ao dano
$\{\Phi^p\}$	Vetor de deformações plásticas
$\{\Phi_0\}$	Vetor de deformações iniciais
$\{\Phi^e\}$	Vetor de deformações elásticas
$\{\Phi_d\}$	Vetor de deformações de dano
$\{\Phi^p\}$	Vetor de deformações plásticas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
<b>3 SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL</b>	<b>15</b>
3.1 PROCESSO CORROSIVO	15
3.1.1 Corrosão por Ação de Íons Cloretos	17
3.1.1.1 <i>Consequências da Corrosão por Íons Cloreto</i>	17
3.1.1.2 <i>Técnica do Potencial de Corrosão</i>	19
3.2 ASPECTOS QUE INFLUENCIAM NO DESLOCAMENTO DE UMA VIGA AO LONGO DO TEMPO	20
3.3 MECÂNICA DO DANO CONCENTRADO	21
3.3.1 Noções Preliminares	21
3.3.1 Teoria do Dano Concentrado	22
3.3.1.1 <i>Simplificação para Elemento Junta Pilar Viga</i>	26
3.4 TERMODINÂMICA DE PÓRTICOS	28
3.4.1 Modelo Termodinâmico Elastoplástico com Encruamento Cinemático, Dano e Corrosão	28
3.4.1.1 <i>Leis de Evolução: Dano, Rotações Plásticas e Corrosão</i>	31
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
4.1 DEFINIÇÃO DAS VIGAS	33
4.1.1 Dimensionamento e Concretagem	33
4.1.2 Caracterização	36
4.2 ETAPA EXPERIMENTAL	37
4.2.1 Ensaio Monossinal	37
4.2.2 Ensaio de Longa Duração - Mistos	40
4.2.3 Ensaio de Longa Duração - Ação Única de Cargas	42
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>43</b>
5.1 VERIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	43
5.2 ENSAIO MONOSSINAL	44
5.3 ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO	47
5.3.1 Avaliação da Corrosão	47
5.3.2 Danificação Mecânica	50

5.3.3 Simulações Numéricas .....	52
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é usado em praticamente todo tipo de construção, embora, como descreve Carvalho e Filho (2007) seu emprego sem nenhum reforço não é adequado, uma vez que o concreto apresenta alta resistência à compressão e resistência baixíssima quando sob tração. Por conseguinte, a aplicação do aço como um complemento atuando de forma a reforçar e conseqüentemente melhorar o comportamento do concreto tracionado é uma prática já aceita há anos (KEARSLEY e JOYCE, 2014).

Broomfield (2006) cita a economicidade e a versatilidade do emprego do concreto armado na construção, tendo em vista que, devido a trabalhabilidade no estado fresco é possível uma variedade de formas e acabamentos, além de permitir estruturas monolíticas, dado a existência da aderência entre o concreto que é lançado sobre aquele já endurecido, o que não ocorre em estruturas de aço, madeira ou pré-moldadas, por exemplo. No entanto, devido às grandes dimensões e alto peso específico tem-se estruturas com grande peso próprio (CARVALHO E FILHO, 2007).

Majoritariamente, de acordo com Broomfield (2006), o concreto armado é destacado pela sua durabilidade, resistência e um bom desempenho ao longo do tempo. Contudo, em especial quando a estrutura está exposta a ambientes agressivos, onde a degradação progride geralmente num ritmo mais acelerado, é indubitável a possibilidade de deterioração do elemento devido à corrosão (KIVELL, PALERMO E SCOTT, 2011). Assim, justifica-se a busca pela criação de novos códigos de projeto baseados no desempenho, como salienta Kearsley e Joyce (2014), que também afirmam que deve-se levar em conta não só o tempo para o início da corrosão da armadura, mas também a estimativa do tempo necessário para que a evolução da degradação desta atinja valores no qual a estrutura passa a não corresponder com a sua finalidade.

De acordo com Broomfield (2006), os problemas decorrentes da corrosão nas armaduras de aço são, atualmente, uns dos principais enfrentados pelos engenheiros civis. Seu efeito mais notório é a redução da área da seção transversal das barras comprometendo assim a resistência à flexão. Todavia, há outros efeitos correlatos, por exemplo, o acúmulo de produtos da corrosão na interface concreto/armadura cujo caráter é expansivo e, portanto, pode gerar pressões radiais no concreto acarretando em lascas e rachaduras (KIVELL, PALERMO E SCOTT, 2011). Porém, a avaliação por meio deste estudo está direcionada em especial à perda da área de aço.

A fim de considerar os efeitos decorrentes da ação da corrosão estudos como o de Coelho (2017) e Dahmer (2018) propõem metodologias com base na Teoria do Dano Concentrado (TDC), a qual apresenta como vantagem a otimização computacional para análise de estruturas de concreto armado, uma vez que, para simplificação considera que as fissuras estão concentradas nas chamadas rótulas plásticas (FLÓREZ-LÓPEZ, MARANTE E PICÓN, 2015). E no caso do segundo estudo além da (TDC), Dahmer (2018), utiliza em conjunto a Termodinâmica de Pórticos, onde, é possível verificar o comportamento da estrutura ao longo da vida útil.

Não obstante, Brant (2019) propõe um modelo termodinamicamente admissível, onde, além da penalização devido à redução da área de aço, considera a evolução do processo de fissuração devido à taxa de corrosão.

Diante disso, o presente estudo visa verificar a influência da evolução da corrosão na danificação de um elemento estrutural de concreto armado, onde é esperado que do mesmo modo que a abertura de fissuras provoca a instauração do processo de dano, provoque também a evolução do fenômeno da corrosão, a qual, concomitantemente, influi para a evolução da danificação da estrutura.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar experimentalmente o comportamento de estruturas de concreto armado submetidas a diferentes níveis de dano e efeitos de corrosão.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

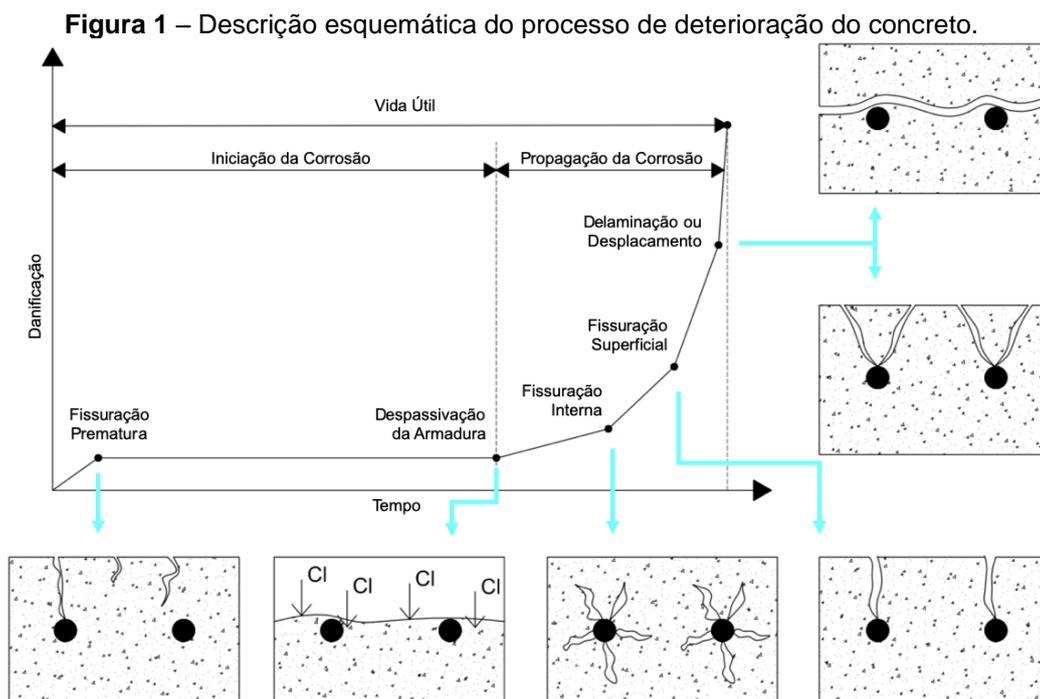
- a) Elaborar uma metodologia para realização dos ensaios necessários;
- b) Avaliar o comportamento da estrutura através do dano mecânico e potencial de corrosão;
- c) Avaliar a influência da corrosão nas deformações tendo como base experimentos mistos;

### 3 SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL

#### 3.1 PROCESSO CORROSIVO

Numa estrutura de concreto armado, tendo em vista a alta alcalinidade do concreto (*i.e.*,  $\text{pH} > 12,5$ ) o aço presente permanece majoritariamente durante longos períodos de tempo num estado passivo, onde, a interrupção desse estado é proveniente de um dos seguintes aspectos: redução da alcalinidade do concreto resultante da carbonatação ou pela penetração de íons cloreto e consequente quebra da camada passivadora (que é resultante da alta alcalinidade nos poros do concreto) (SONG e SARASWATHY, 2006).

Ainda de acordo com Song e Saraswathy (2006), o tempo para o início da corrosão é condicionado em especial pela espessura e qualidade do cobrimento na seção transversal, bem como a permeabilidade do concreto. Dessa forma, principalmente em ambientes de forte agressividade ambiental necessita-se de um concreto durável e de alta qualidade, para assim frear a rápida deterioração do concreto devido a formação de fissuras, e consequentemente postergar o processo de iniciação e propagação da corrosão, que pode ser observado de forma detalhada na Figura 1 (SONG e SARASWATHY, 2006; CUSSON, LOUNIS E DAIGLE, 2011).

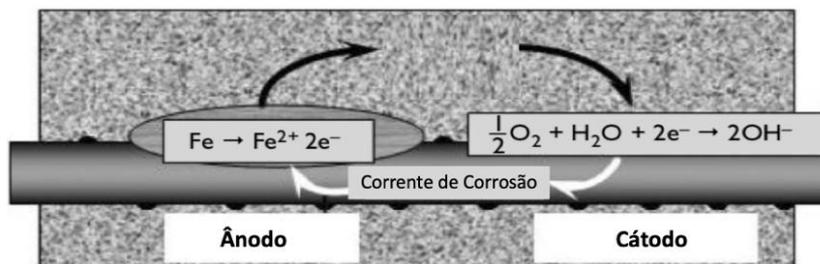


Fonte: Adaptado de Cusson, Lounis e Daigle, 2011.

A reação química que indica o início da formação de corrosão na armadura é representado pela (Equação 1), sendo esta anódica, cede elétrons que na presença de água e oxigênio juntam-se formando uma reação catódica (Equação 2), esse processo está ilustrado na Figura 2 (BROOMFIELD, 2006).



**Figura 2** – Processo de início da corrosão.



**Fonte:** Adaptado de Broomfield, 2006.

Contudo, de acordo com Broomfield (2006) nessa etapa não se verá ainda fissuras ou deslocamento do concreto, pois trata-se do processo originário. Para aparição dos produtos esperados pela corrosão existe uma série de estágios ainda, os quais podem ser expressos pelas Equações 3, 4 e 5, onde, a Equação 5 (óxido férrico hidratado) já representa o que conhecemos por ferrugem.



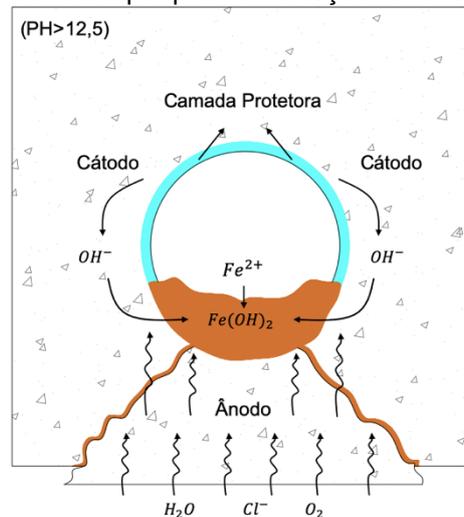
A forma de aparição da corrosão nas armaduras pode variar, segundo Hunkeler (2005), entre o surgimento generalizado ou um ataque local (corrosão por pite). No caso da carbonatação o mais comum é a corrosão geral acarretando em trincas e fragmentação precoce do concreto, entretanto, se for proveniente de ataque por íons-cloreto, tem-se a formação de cavidades pontuais (pites) nas barras de aço reduzindo a seção transversal (HUNKELER, 2005). No presente trabalho dar-se-á prioridade à segunda forma de aparição da corrosão (*i.e.*, ataque local), a qual será melhor descrita no que segue.

### 3.1.1 Corrosão por Ação de Íons Cloretos

Diferentemente da atuação por carbonatação, onde a alcalinidade dos poros é neutralizada, no caso do ingresso de íons cloreto tem-se um ataque na camada passiva, no entanto, não há uma atenuação completa no pH, mas sim uma catalisação da corrosão por parte dos cloretos, sempre e quando esses encontram-se em quantidades suficientes na barra de aço para quebrar a barreira passiva (ZHAO e JIN, 2016).

Zhao e Jin (2016) afirmam ainda que, em virtude do acúmulo dos íons cloretos na superfície do aço pode-se observar a formação de corrosão por pite em alguns locais da armadura, conforme ilustrado na Figura 3. Dado que ocorre uma redução na área da seção transversal das barras tem-se o comprometimento da capacidade de carga dos elementos de concreto armado, ademais, o principal agravante nessa situação é o fato de que para se ter evidências aparentes é bem provável que a corrosão já se encontra em níveis avançados (ZHAO e JIN, 2016).

**Figura 3** – Processo de corrosão por pite numa seção transversal de concreto armado.



Fonte: Adaptado de Cao e Cheung, 2014.

#### 3.1.1.1 Consequências da Corrosão por Íons Cloreto

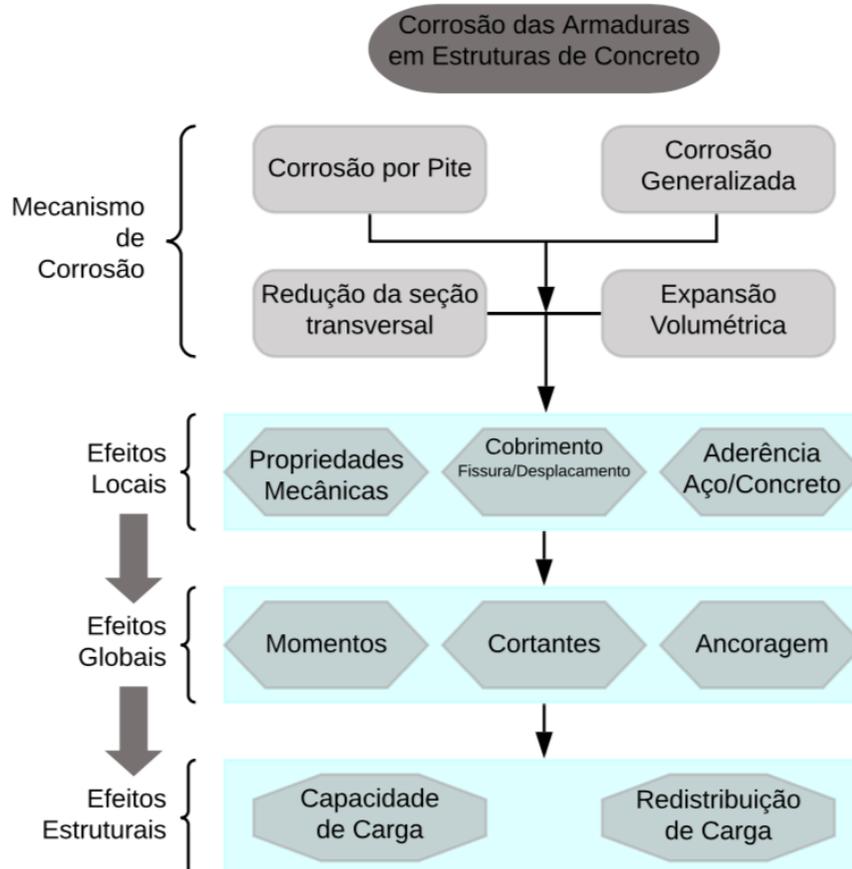
Quando o processo alcança a última etapa formando o óxido férrico hidratado (Equação 5) na interface concreto/armadura tem-se ali, de acordo com Broomfield (2006), uma expansão volumétrica de seis a dez vezes o volume do Ferro ( $Fe$ ) presente na liga aço. De acordo com Gentil (1996), essa expansão gera uma pressão sobre o concreto levando assim à formação de fissuras que podem avançar provocando

laminação e posterior desprendimento de pequenos pedaços de concreto reduzindo então, inicialmente, a espessura do cobrimento de concreto, bem como a seção transversal do elemento (TAHERSHAMSI, 2016).

Tahershamsi (2016) destaca ainda a própria redução da seção transversal da armadura de aço penalizando não apenas os momentos (plástico e último) como também a ductilidade da armadura afetando assim a rigidez da estrutura, e não menos importante percebe-se inclusive uma redução da aderência.

Dessa forma, nota-se a evolução da amplitude das consequências desde a formação da ferrugem até a possibilidade de comprometimento da capacidade de carga da estrutura, passando assim de efeitos localizados para efeitos estruturais como observa-se na Figura 4 (TAHERSHAMSI, 2016).

**Figura 4 – Efeitos da Corrosão.**



Fonte: Adaptado de Tahershamsi, 2016.

A respeito da redução na ductilidade da armadura Du, Clark e Chan (2005) avaliaram a redução na tensão de escoamento e propuseram as Equações 6 e 7 a serem levadas em consideração quando na presença de corrosão.

$$f_{yc} = (1 - 0,005Q_{corr})f_y \quad (\text{Equação 6})$$

$$Q_{corr} = \frac{0,046i_{corr} t}{\phi} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde a tensão de escoamento inicial para uma barra de aço intacta  $f_y$  é penalizada de acordo à quantidade de corrosão  $Q_{corr}$  sendo denominada então de  $f_{yc}$ . Para a obtenção de  $Q_{corr}$  (%) deve-se conhecer a taxa de corrosão  $i_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ ) considerando o tempo  $t$  transcorrido desde o início da corrosão e também o diâmetro da barra  $\phi$ .

### 3.1.1.2 Técnica do Potencial de Corrosão

Uma forma de avaliar o processo corrosivo, em especial, a iniciação da corrosão é por meio de ensaios não destrutivos. Elsener *et al.* (2003) indicam as medições por meio de potencial de corrosão ( $E_{cor}$ ) para estruturas em concreto armado expostas à atmosfera, salientando ainda que o método pode ser empregado a qualquer idade e em qualquer tipo de clima, entretanto, a superfície deve estar livre de camadas isolantes (e.g. tintas e revestimentos). Contudo, Ribeiro (2010) apresenta como desvantagem a impossibilidade de obtenção de resultados relacionados à velocidade de corrosão da armadura, ou seja, tem-se apenas dados qualitativos.

A técnica consiste na medição da diferença de potencial entre um eletrodo de trabalho (armadura) e um eletrodo de referência podendo ser o eletrodo de cobre/sulfato de cobre (ELSENER *et al.*, 2003). Os autores salientam ainda que, a diferença de potencial torna-se menor a medida em que a distância até a armadura aumenta, ou seja, verifica-se dessa forma a influência do cobrimento nos resultados obtidos.

Para a interpretação dos resultados pode-se aplicar as prescrições da C876 (ASTM, 2015), uma vez que, por meio dessa torna-se possível classificar quanto à probabilidade de o processo corrosivo estar instaurado nas armaduras embebidas no concreto em função do potencial de corrosão registrado, para tal utiliza-se a Tabela 1.

**Tabela 1** – Probabilidade de Corrosão em Função do Potencial de Corrosão.

Leitura Registrada (Multímetro)	Probabilidade de Corrosão
> Eletropositivo que -200 mV	< 10%
Entre -200 mV e -350 mV	incerta
> Eletronegativo que -350 mV	>90%

Fonte: Adaptado da ASTM C876, 2015.

### 3.2 ASPECTOS QUE INFLUENCIAM NO DESLOCAMENTO DE UMA VIGA AO LONGO DO TEMPO

De forma geral, Baroni (2003) agrupa os contribuintes para o deslocamento de uma estrutura como sendo o resultado da soma de uma parcela proveniente das deformações imediatas e outra daquelas diferidas ao longo do tempo, sendo que essas ocorrem devido à retração e a fluência. Assim sendo, serão apresentados sucintamente ambos os conceitos.

A retração pode ser entendida como a redução no volume do concreto, originado principalmente pela perda de água no processo de secagem, mas também podendo ser causado pela hidratação do cimento ou pela carbonatação (GILBERT, 2001). O autor salienta que esse efeito é mais significativo no caso de concretos com baixo teor de água, com uso de sílica ativa e em especial quando aplicados em lajes de grandes superfícies expostas.

Pinheiro, Muzardo e Santos (2004) definem a fluência como um acréscimo de deformação ao longo do tempo, considerando atuação permanente da carga. Para Neville (2013), os principais aspectos relacionados à fluência são os agregados empregados juntamente com a relação água/cimento, assim como a umidade relativa e temperatura.

Sendo assim, dado a presença de carregamento de longa duração e conseqüente influência do processo de fluência a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta um equacionamento para se levar em conta a flecha adicional diferida no tempo. Calcula-se um fator  $\alpha_f$  (Equação 8) e este deve ser multiplicado pela flecha imediata, onde,  $\xi'$  depende do tempo e é obtido mediante aplicação da Equação 10. Quanto ao  $\rho'$  tem-se a Equação 11 e esse está relacionado com a seção transversal e a armadura de compressão  $As'$ .

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi'}{1 + 50\rho'} \quad \text{(Equação 8)}$$

$$\begin{cases} \xi'(t) = 0,68(0,996^t)t^{0,32} & \text{se } t \leq 70 \text{ meses} \\ \xi'(t) = 2 & \text{se } t > 70 \text{ meses} \end{cases} \quad \text{(Equação 9)}$$

$$\Delta \xi' = \xi'(t) - \xi'(t_0) \quad \text{(Equação 10)}$$

$$\rho' = \frac{As'}{bd} \quad \text{(Equação 11)}$$

Ao observar a Equação 9, nota-se que a NBR 6118 (ABNT, 2014) assume

uma variabilidade do coeficiente de fluência até alcançar aproximadamente 6 anos da aplicação do carregamento e após isso torna-se independente do tempo assumindo um valor constante.

### 3.3 MECÂNICA DO DANO CONCENTRADO

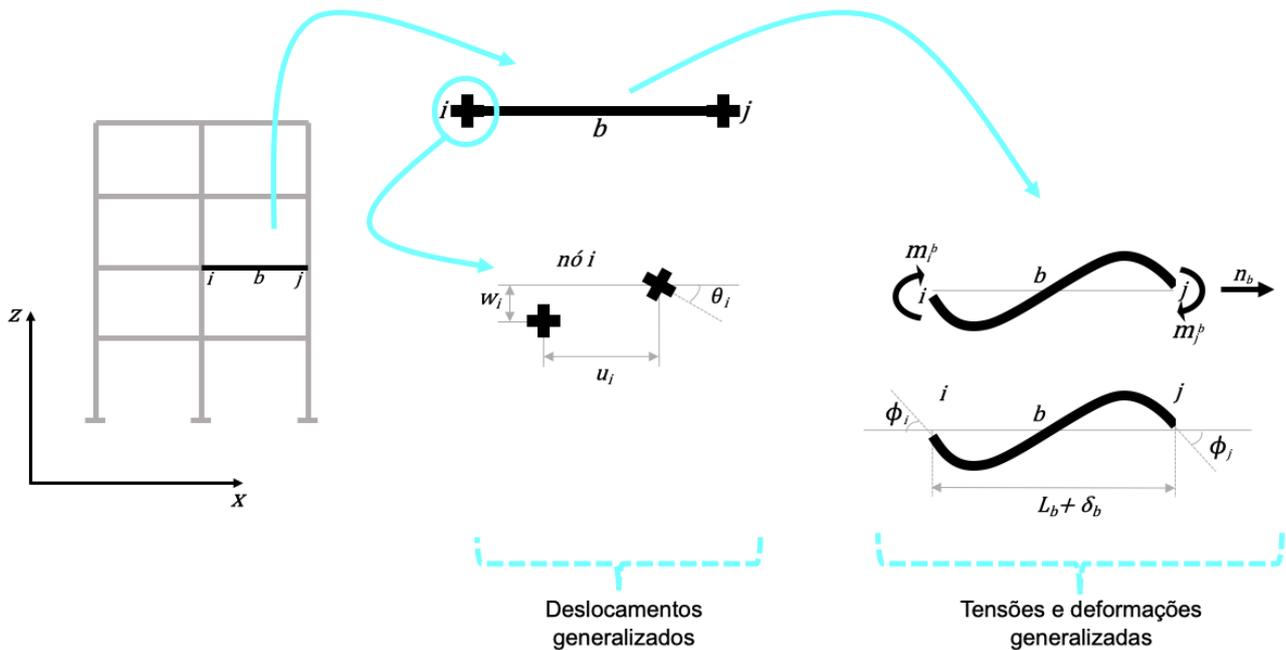
O desenvolvimento das pesquisas no campo da mecânica dos sólidos (prelúdio da mecânica do dano concentrado) foi impulsionado pelo trabalho pioneiro de Kachanov (1958), onde, segundo Cipollina, López-Inojosa e Flórez-López (1995) esse consistiu na inserção do dano como uma nova variável interna, responsável pela quantificação da densidade das microfissuras e microvazios, e, sua influência no comportamento do material. Entretanto, os mesmos autores chamam a atenção para o fato de que esse modelo embora tenha sido muito usado para modelar a maioria dos materiais de construção, não apresenta a mesma vantagem e facilidade ao se tratar da análise de estruturas de engenharia civil, haja vista sua maior complexidade.

Dessa forma, um modelo que contempla os conceitos da mecânica da fratura e da mecânica do dano contínuo de uma forma simplificada é proposto por Cipollina, López-Inojosa e Flórez-López (1995) e será discriminado na sequência.

#### 3.3.1 Noções Preliminares

Ao representar uma estrutura de concreto armado, seja de forma bidimensional ou até mesmo tridimensional é conveniente separá-la em segmentos de tamanho finito (Figura 5), limitado pelos nós inicial e final  $i$  e  $j$ , respectivamente. Seguindo, pode-se agrupar as forças generalizadas em cada nó (que inclui: os carregamentos distribuídos, as cargas concentradas e momentos), bem como os deslocamentos generalizados nos nós (podendo ser deslocamentos e rotações), ademais, as deformações generalizadas sofridas pelo elemento compostas por rotações relativas e alongações tanto das parcelas elásticas e plásticas quanto de dano.

**Figura 5** – Deslocamentos generalizados num nó, e tensões e deformações generalizadas num segmento de viga.



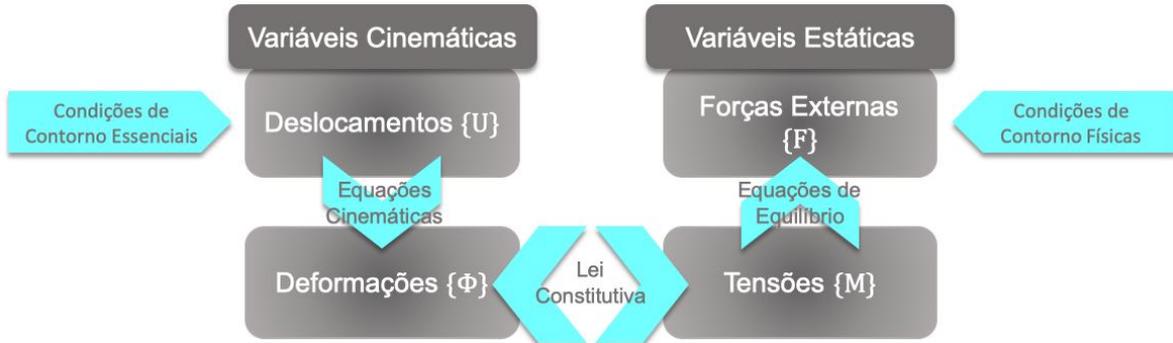
Fonte: Adaptado de Flórez-López, Marante e Picón, 2015.

### 3.3.1 Teoria do Dano Concentrado

A TDC Consiste em assumir que a danificação nos elementos de concreto armado está concentrada nas rótulas, denominadas de rótula plástica ou rótula inelástica (FLÓREZ-LÓPEZ, MARANTE E PICÓN, 2015). Ainda segundo os mesmos autores, para identificar e quantificar a propagação de fissuras faz-se necessário a introdução de novas variáveis internas  $d_i$  e  $d_j$ , como estas representam a densidade de fissuração (dano) do elemento os valores encontrados devem estar entre 0 e 1, onde, quanto mais próximo do valor unitário maior é o grau de fissuração e conseqüentemente mais comprometida está a estrutura.

No entanto, essas variáveis terão sua participação a partir do instante em que se apresentam as leis constitutivas. O procedimento a ser seguido para análise do problema estrutural, por meio da teoria do dano concentrado resume-se de forma sequencial na Figura 6.

**Figura 6** – Esquema do processo de análise pelo modelo de dano concentrado.



Fonte: Adaptado de Flórez-López, Marante e Picón, 2015.

Contudo, de início detalha-se a estrutura a ser analisada, ou seja, definem-se as propriedades dos materiais que a compõem, assim como as características da seção dos elementos. Posteriormente, detalha-se os vetores que foram comentados no item 3.3.1: deslocamentos generalizados  $\{U\}$  e deformações generalizadas  $\{\Phi\}_b$ .

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ w_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \\ w_n \\ \theta_n \end{Bmatrix} \quad (\text{Equação 12}) \quad \{\Phi\}_b = \begin{Bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \delta \end{Bmatrix} \quad (\text{Equação 13})$$

E então por meio das equações cinemáticas (Equação 14), torna-se possível relacionar os deslocamentos generalizados de cada elemento da estrutura para obtenção das deformações generalizadas, bastando considerar a matriz de transformação cinemática  $[B]_b$  associada a cada um desses elementos, a qual relaciona os eixos locais com os globais por meio do ângulo  $\alpha_b$  entre eles e o comprimento  $L_b$  do elemento.

$$[B]_b = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \frac{\sin \alpha_b}{L_b} & -\frac{\cos \alpha_b}{L_b} & 1 & \dots & -\frac{\sin \alpha_b}{L_b} & \frac{\cos \alpha_b}{L_b} & 0 & \dots \\ 0 & \dots & \frac{\sin \alpha_b}{L_b} & -\frac{\cos \alpha_b}{L_b} & 0 & \dots & -\frac{\sin \alpha_b}{L_b} & \frac{\cos \alpha_b}{L_b} & 1 & \dots \\ 0 & \dots & -\cos \alpha_b & -\sin \alpha_b & 0 & \dots & \cos \alpha_b & \sin \alpha_b & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 14})$$

$$\{\Phi\}_b = [B]_b \{U\} \quad (\text{Equação 15})$$

Já em relação as forças externas, as quais podem ser forças concentradas, forças distribuídas ou momentos. Todas essas forças estarão descritas no vetor  $\{P\}$  (Equação 16), onde  $Pu_n$  representa a força externa horizontal,  $Pw_n$  representa a força externa vertical e  $M_n$  um momento fletor no nó.

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} Pu_1 \\ Pw_1 \\ M_1 \\ \vdots \\ Pu_n \\ Pw_n \\ M_n \end{Bmatrix} \quad (\text{Equação 16})$$

Ademais, tem-se o vetor de tensões generalizadas, representado na Figura 5, composto pelos momentos internos nos nós  $i$  e  $j$  (Equação 17).

$$\{M\}_b = \begin{Bmatrix} m_i^b \\ m_j^b \\ n_b \end{Bmatrix} \quad (\text{Equação 17})$$

Com isso, pode-se aplicar a equação de equilíbrio (Equação 18) e assim relacionar todos os vetores de tensões generalizadas com as forças externas.

$$\sum ([B]_b^t \{M\}_b) = \{P\} \quad (\text{Equação 18})$$

E finalmente, para correlacionar as variáveis cinemáticas com as variáveis estáticas, utilizam-se as leis constitutivas, que por sua vez, dividem-se em: lei de elasticidade, plasticidade e de dano.

Para descrever a lei de elasticidade tem-se a Equação 20, esta, é escrita para cada elemento que compõe a estrutura onde o produto da matriz de flexibilidade pelo vetor de tensões generalizadas agregado às deformações iniciais correspondem a diferença entre as deformações generalizadas (Equação 19) e as deformações plásticas.

$$\{\Phi\}_b = \{\Phi_e\}_b + \{\Phi_p\}_b + \{\Phi_d\}_b \quad (\text{Equação 19})$$

$$\{\Phi - \Phi_p\}_b = [F(D)]_b \{M\}_b + \{\Phi_0\}_b \quad (\text{Equação 20})$$

E para cada elemento danificado de um pórtico, a matriz  $[F(D)]_b$  é escrita da seguinte maneira (Equação 21).

$$[F(D)] = \begin{bmatrix} \frac{L_b}{3E_c I(1-d_i)} & -\frac{L_b}{6E_c I} & 0 \\ -\frac{L_b}{6E_c I} & \frac{L_b}{3E_c I(1-d_j)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_b}{AE_c} \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 21})$$

Já a lei de evolução do dano baseia-se no critério de Griffith, que relaciona a propagação da fissura com a taxa de liberação de energia  $G$  e a resistência à fissuração  $R$ . Desta forma, só é possível a evolução da trinca se a derivada da energia total em relação ao comprimento da trinca for igual a zero, ou seja,  $G = R$  (FLÓREZ-

LÓPEZ, MARANTE E PICÓN, 2015).

Assim, com a energia de deformação complementar representada por  $W_b$  (Equação 22) e derivando em relação ao dano Equações 23 e 24, tem-se a taxa de liberação de energia  $G_i$  e  $G_j$  para um elemento  $b$ .

$$W_b = \frac{1}{2} \{M\}_b^t \{\Phi - \Phi_p\}_b = \frac{1}{2} \{M\}_b^t ([F(D)]_b \{M\}_b + \{\Phi_0\}_b) \quad (\text{Equação 22})$$

$$G_i = \frac{\partial W_b}{\partial d_i} = \frac{Lm_i^2}{6E_c I(1-d_i)^2} \quad (\text{Equação 23})$$

$$G_j = \frac{\partial W_b}{\partial d_j} = \frac{Lm_j^2}{6E_c I(1-d_j)^2} \quad (\text{Equação 24})$$

Para representar a resistência à fissuração do concreto tem-se como aproximação a Equação 25, onde  $R_0$  (Equação 26) indica a resistência inicial do concreto. Para tal é necessário o cálculo do momento de fissuração  $M_{cr}$ , já o termo adicional representa o incremento da resistência devido a presença da armadura na seção, na qual primeiramente faz-se necessário definir  $d_u$ , derivando a Equação 27 em relação a  $d$  e igualando a zero e posteriormente aplicá-lo diretamente na (Equação 27) fazendo  $m = M_u$  e assim encontrar  $q$ .

$$R(d) = R_0 + q \frac{\ln(1-d)}{(1-d)} \quad (\text{Equação 25})$$

$$R_0 = \frac{M_{cr}^2 L_b}{6E_c I} \quad (\text{Equação 26})$$

$$m^2 = \frac{6E_c I(1-d)^2}{L_b} R_0 + \frac{6qE_c I}{L_b} (1-d) \ln(1-d) \quad (\text{Equação 27})$$

com  $m = M_u$  e  $d = d_u$

Por fim, torna-se possível acompanhar a evolução por meio da lei de dano Equação 28.

$$\begin{cases} \dot{d} = 0 & \text{se } G < R \\ G = R & \text{se } \dot{d} > 0 \end{cases} \quad (\text{Equação 28})$$

Como mencionado anteriormente, na Teoria do Dano Concentrado tem-se a inserção da variável de dano  $d$ , ademais, contemplam-se deformações plásticas  $\Phi_p$  nas rótulas inelásticas e o cálculo destas se dá por meio da lei de plasticidade (Equação 29).

$$\begin{cases} f < 0 \Rightarrow \dot{\phi}^p = 0 \\ \dot{\phi}^p \neq 0 \Rightarrow f = 0 \end{cases} \quad (\text{Equação 29})$$

A função de escoamento  $f$  leva em conta o encruamento cinemático e é determinada pelas Equações 30 e 31, em que  $k_0$  é obtido a partir da determinação do dano  $d_p$  na rótula plástica ao atingir o momento de plastificação  $M_p$ . Nesse instante a função de escoamento assume pela primeira vez valor igual a zero e dá início à plastificação e, portanto, ainda se admite  $\dot{\phi}^p = 0$ , tendo-se então a Equação 32.

$$f_i = \left| \frac{m_i}{1 - d_i} - h\dot{\phi}_i^p \right| - k_0 \quad (\text{Equação 30})$$

$$f_j = \left| \frac{m_j}{1 - d_j} - h\dot{\phi}_j^p \right| - k_0 \quad (\text{Equação 31})$$

$$k_0 = \frac{M_p}{1 - d_p} \quad (\text{Equação 32})$$

Com relação ao  $h$  (Equação 33) é obtido ao substituir a Equação 32 em 30 para o momento último  $M_u$  e seu respectivo dano  $d_u$ , ademais, nessa situação a rotação plástica deixa de ser zero e passa a ser calculada pela Equação 34.

$$h = \frac{1}{\phi_{pu}} \left( \frac{M_u}{1 - d_u} - \frac{M_p}{1 - d_p} \right) \quad (\text{Equação 33})$$

$$\phi_{pu} = \phi_u - \phi_p \quad (\text{Equação 34})$$

$$\phi_u = \chi_u L_p \quad (\text{Equação 35})$$

$$\phi_p = \chi_p L_p \quad (\text{Equação 36})$$

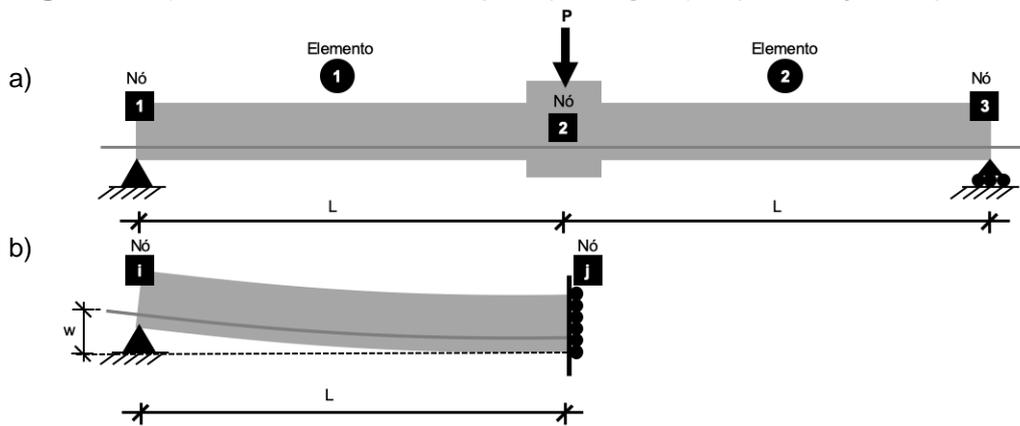
$$L_p = 0,5dd + 0,025L_{cs} \quad (\text{Equação 37})$$

Onde,  $\chi_u$  e  $\chi_p$  indicam as curvaturas última e plástica para a seção do elemento em estudo. Para  $L_p$  considera-se a altura útil da seção  $dd$  mais o comprimento entre a seção crítica e o ponto de inflexão no diagrama de momento fletor.

### 3.3.1.1 Simplificação para Elemento Junta Pilar Viga

Flórez-López, Marante e Picón (2015) apresentam uma simplificação para determinação experimental do dano em uma rótula plástica em uma situação específica, que é um elemento simétrico que apresenta uma junta pilar viga e está simplesmente apoiada em seus extremos (Figura 7).

**Figura 7** – a) Elemento estrutural com junta pilar viga. b) Representação simplificada.



Dado a simetria existente no elemento estrutural (Figura 7a) e por consequência a equivalência dos deslocamentos e deformações nos nós 1 e 3, bem como das forças internas nos elementos 1 e 2 pode-se trabalhar simplesmente com a representação indicada na Figura 7b.

Sabe-se que o momento é nulo no nó  $i$ , e que em  $j$  (Figura 7) pode-se obter o valor do momento pela Equação 38. Ainda, pela equação cinemática escreve-se a Equação 39 e, portanto, utilizando a lei de elasticidade (Equação 20) é possível a obtenção da Equação 40.

$$m_j = \frac{PL}{2} \quad (\text{Equação 38})$$

$$\phi_j = \frac{w_j}{L} \quad (\text{Equação 39})$$

$$w_j - w_j^p = \frac{PL^3}{6E_c I(1 - d_j)} \quad (\text{Equação 40})$$

Evidenciando a carga  $P$  da Equação 40 escreve-se a Equação 41, onde  $Z$  pode ser escrito como sendo  $Z_0$  (Equação 42) para o caso da inclinação inicial (primeira descarga), em um gráfico força *versus* deslocamento de um ensaio monossinal, ou seja, nota-se proporcionalidade direta da inclinação com a rigidez. No entanto, a partir do início de danificação na estrutura a inclinação da reta (representação das descargas) passa a reduzir, sendo assim, faz-se necessário escrever uma nova equação considerando a redução da rigidez a medida em que são realizadas as descargas, tem-se então a Equação 43.

$$P = Z(1 - d_j)w_j - w_j^p \quad (\text{Equação 41})$$

$$Z_0 = \frac{6E_c I}{L^3} \quad (\text{Equação 42})$$

$$Z(d) = Z_0(1 - d_j) \quad (\text{Equação 43})$$

Portanto, pode-se obter o valor do dano no nó  $j$  para cada valor de carga aplicada por meio da Equação 44.

$$d = 1 - \frac{Z(d)}{Z_0} \quad (\text{Equação 44})$$

### 3.4 TERMODINÂMICA DE PÓRTICOS

O estado de um sistema é dado por conhecido sempre e quando todas as variáveis necessárias para a sua avaliação e consequente caracterização estão disponíveis, dessa forma, como descrito por Pituba (1998). Para uma completa definição do estado termodinâmico de um sistema, faz-se necessário além das informações geométricas no estado inicial, campos de tensões e deformações, uma especificação das substâncias químicas que o compõem, e a todos esses valores denominam-se variáveis de estado, onde, a seleção dessas constituem uma etapa chave para a resolução de cada problema em particular.

Dessa forma, com base nesses princípios (provenientes da termodinâmica de sólidos) juntamente com os conceitos da Mecânica do Dano Concentrado (item 3.3), Dahmer (2018) e Brant (2019) propõem uma série de equações termodinâmicas para pórticos, por meio das quais torna-se possível levar em consideração o comportamento elastoplástico com encruamento cinemático do concreto armado, aliados ao dano e aos efeitos de corrosão nas armaduras de aço. Assim sendo, por meio desses equacionamentos permite-se uma melhor representação do comportamento de um elemento estrutural ao longo de sua vida útil. Portanto, apresenta-se uma síntese desse desenvolvimento nos tópicos subsequentes.

#### 3.4.1 Modelo Termodinâmico Elastoplástico com Encruamento Cinemático, Dano e Corrosão

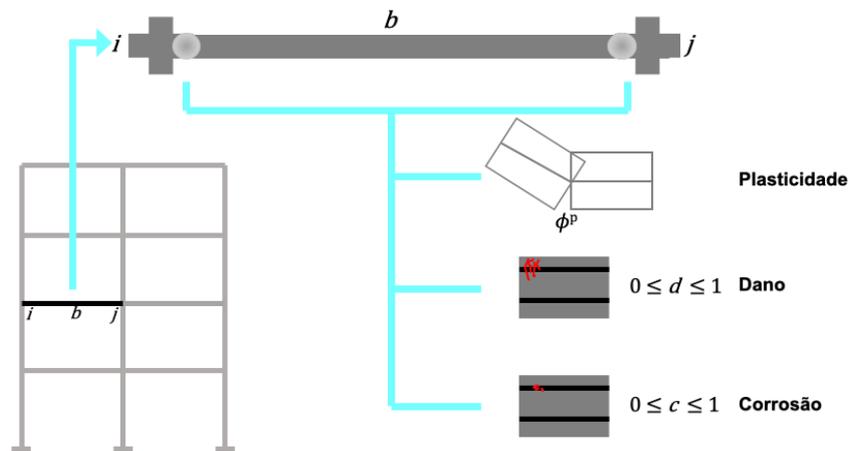
Diferentemente do modelo apresentado no item 3.3 onde os fenômenos químicos não eram contemplados, agora, utilizando-se da combinação da Mecânica do Dano Concentrado com as ferramentas da Termodinâmica de Pórticos passa-se a considerar uma nova variável interna  $c$ . Essa variável é situada nas extremidades do

elemento, mais especificamente nas rótulas inelásticas ( $c_i$  e  $c_j$ ), a qual indica a taxa de corrosão na armadura presente na estrutura e é calculada pela Equação 45, onde  $\bar{p}$  é a média das profundidades de pite e  $\bar{\phi}$  a média dos diâmetros das barras que se encontram na seção transversal.

$$c = cor = \frac{\bar{p}}{\bar{\phi}} \quad (\text{Equação 45})$$

Assim sendo, de forma ilustrativa as variáveis internas contempladas pelo modelo são apresentadas na Figura 8.

**Figura 8** – Variáveis internas localizadas nas rótulas inelásticas.



Devido a redução na seção transversal das barras de aço provocada pela corrosão, faz-se necessário o recálculo da área de aço, uma vez que, essa afeta o cálculo das propriedades iniciais da seção em análise. Isto posto, obtém-se a área efetiva pela Equação 46 proposta por Brant (2019) com base em Val e Melchers (1997), onde,  $A_0$  corresponde a área de aço inicial e  $Kcor$  é definido pela Equação 47.

$$A_{ef} = \frac{A_0}{\pi} \begin{cases} Kcor + \pi - \arcsin 2cor \sqrt{-cor^2 + 1}, & \text{se } cor < \frac{\sqrt{2}}{2} \\ Kcor + \arcsin 2cor \sqrt{-cor^2 + 1}, & \text{se } cor \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases} \quad (\text{Equação 46})$$

$$Kcor = -4cor^2 \arcsin \sqrt{-cor^2 + 1} + 2cor \sqrt{-cor^2 + 1} \quad (\text{Equação 47})$$

Como supracitado, por meio da termodinâmica busca-se descrever o problema por meio de variáveis de estado, onde, as quais derivam de um potencial a ser definido. Neste caso, o potencial escrito por Brant (2019) que abrange o dano, a plastificação e a corrosão é dado pela Equação 48.

$$Gb_b = \frac{1}{2}\{M\}^t[F(D)]\{M\} + \{M\}^t\{\Phi_0\} + \{M\}^t\{\Phi^p\} - \frac{1}{2}\{\Phi^p\}^t[H(D,C)]\{\Phi^p\} - I(D,C) + \frac{\{O\}^t\{C\}}{\xi} \quad (\text{Equação 48})$$

Dentre os termos presentes a matriz de flexibilidade  $[F(D)]$  não sofreu alteração, ou seja, continua sendo descrita pela Equação 21, enquanto a expressão do encruamento da armadura passa agora a estar em função também da corrosão (Equação 49). Assim como o incremento da resistência ao processo de fissuração devido à armadura, o qual é descrito conforme a Equação 50. Com relação ao vetor  $\{O\}^t$  escreve-se para cada nó e depende apenas da função escolhida da literatura para indicar a taxa de evolução da corrosão, no caso para um nó  $i$  de acordo ao modelo utilizado por Brant (2019) descreve-se a evolução com base na Equação 51.

$$[H(D,C)] = \begin{bmatrix} (1-d_i)h_i(c_i) & 0 & 0 \\ 0 & (1-d_j)h_j(c_j) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 49})$$

$$I(D,C) = -\frac{1}{2}q(c_i)ln^2(1-d_i) - \frac{1}{2}q(c_j)ln^2(1-d_j) \quad (\text{Equação 50})$$

$$O_i = \frac{0,0116Rel[i_{cor}(t_{tr} - t_{ini}) + i_{cor}]}{\phi} \quad (\text{Equação 51})$$

Para definir a Equação 51, faz-se necessário conhecer *Rel* que é obtido pela relação entre a profundidade máxima e a profundidade média do pite, bem como a taxa de corrosão  $i_{cor}$ , o tempo transcorrido com corrosão  $t_{tr}$  e ainda o tempo onde se iniciou a corrosão  $t_{ini}$ , todos em anos.

Agora torna-se possível a atualização dos equacionamentos, considerando a corrosão, apresentados no item 3.3. Inicia-se com a lei de elasticidade (Equação 52), que é resultado da derivada parcial da Equação 48 em relação às tensões.

$$\left\{ \frac{\partial Gb_b}{\partial M} \right\} = [F(D)]\{M\} + \{\Phi_0\} + \{\Phi^p\} = \{\Phi\} \quad (\text{Equação 52})$$

A função de escoamento está associada à força termodinâmica  $A^p$  proveniente da derivada parcial em relação às deformações plásticas, tem-se assim a Equação 53.

$$\left\{ \frac{\partial Gb_b}{\partial \Phi^p} \right\} = \{M\} - [H(D,C)]\{\Phi^p\} = \left\{ \begin{matrix} m_i - (1-d_i)h_i(c_i)\phi_i^p \\ m_j - (1-d_j)h_j(c_j)\phi_j^p \\ n \end{matrix} \right\} = \{A^p\} \quad (\text{Equação 53})$$

Derivando em relação ao dano obtém-se a força termodinâmica relacionada à fissuração  $A_d$  (Equação 54).

$$\left\{ \frac{\partial G b_b}{\partial d} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{Lm_i^2}{6EI(1-d_i)^2} - q(c_i) \frac{\ln(1-d_i)}{(1-d_i)} + \frac{1}{2} h(c_i) (\phi_i^p)^2 \\ \frac{Lm_j^2}{6EI(1-d_j)^2} - q(c_j) \frac{\ln(1-d_j)}{(1-d_j)} + \frac{1}{2} h(c_j) (\phi_j^p)^2 \end{array} \right\} = \{A_d\} \quad (\text{Equação 54})$$

E por fim, a força termodinâmica associada à corrosão  $A_c$  é expressa pela Equação 55.

$$\left\{ \frac{\partial G b_b}{\partial cor} \right\} = -\frac{1}{2} \{\Phi^p\}^t \left[ \frac{\partial H(D, C)}{\partial cor} \right] \{\Phi^p\} - \left\{ \frac{\partial I}{\partial cor} \right\} + \frac{\{O\}}{\xi} = \{A_c\} \quad (\text{Equação 55})$$

### 3.4.1.1 Leis de Evolução: Dano, Rotações Plásticas e Corrosão

Dado que por meio da termodinâmica introduziu-se uma nova variável, faz-se necessário a atualização das leis de evolução indicadas pelas Equações 28 e 29, bem como a consideração de uma lei de evolução para a taxa de corrosão. Assim sendo, tem-se no que segue o momento impulsionador do dano  $Y_i$  (Equação 56) com sua lei de evolução (Equação 57) para um nó  $i$ .

$$Y_i = A_{di} - \frac{1}{2} h(c_i) (\phi_i^p)^2 - R_0 = \frac{Lm_i^2}{6EI(1-d_i)^2} - q(c_i) \frac{\ln(1-d_i)}{(1-d_i)} - R_0 \quad (\text{Equação 56})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 0 \text{ se } Y_i < R_0 \text{ ou } Y_i < 0 \\ d_i > 0 \text{ se } Y_i = R_0 \text{ ou } Y_i = 0 \\ Y_i > R_0 \text{ ou } d_i < 0 \text{ impossível} \end{array} \right. \quad (\text{Equação 57})$$

Da mesma forma reescreve-se a função de escoamento (Equação 58) acompanhada da lei de evolução das rotações plástica (Equação 59), equivalente ao apresentado no item 3.3.2.

$$f_i = [A_{pi}] - (1-d_i)k_0(c_i) = [m_i - (1-d_i)h(c_i)\phi_i^p] - (1-d_i)k_0(c_i) \leq 0 \quad (\text{Equação 58})$$

$$\phi_i^p = \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial A_{pi}}; \left\{ \begin{array}{l} \lambda_i = 0 \text{ se } f_i < 0 \\ \lambda_i > 0 \text{ se } f_i = 0 \\ f_i > 0 \text{ impossível} \end{array} \right. \quad (\text{Equação 59})$$

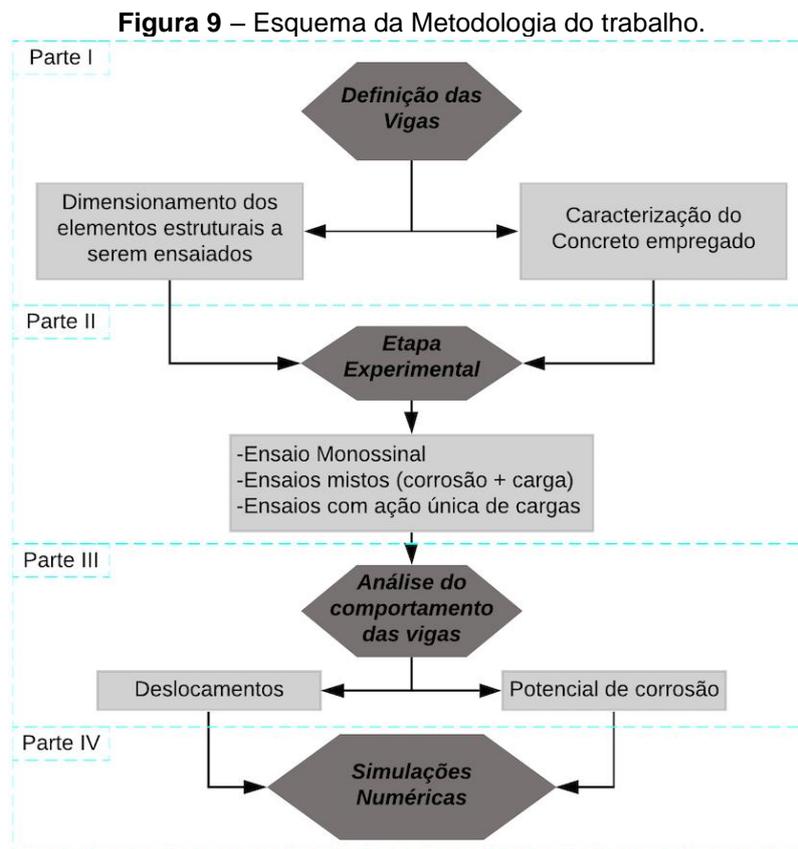
Vale destacar que os parâmetros presentes nos equacionamentos acima ( $h(c_i), R_0, q(c_i), k_0$ ) são calculados da mesma forma que o exposto no item 3.3. A divergência ocorre apenas no fato de que agora torna-se necessário o recálculo destes, uma vez que, a degradação evolui e conseqüentemente os valores de momentos de fissuração, plástico e último sofrem penalizações.

Diferentemente das leis anteriores, a lei de evolução da corrosão (Equação 60) necessita a dependência do tempo (BRANT, 2019). Percebe-se na expressão abaixo (Equação 60) a composição de três parcelas de diferentes origens, a primeira proveniente das leis empíricas, seguido do termo associado ao processo de fissuração do concreto e, por fim, a parcela relacionada ao processo de plastificação das armaduras.

$$c_i = \xi A_{ci} = O_i + \xi \left( \ln^2(1 - d_i) \frac{\partial q}{\partial c_i} - \phi_p^2(1 - d_i) \frac{\partial h}{\partial c_i} \right) \quad (\text{Equação 60})$$

## 4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho optou-se pela separação nas seguintes etapas: (1) Definição das vigas a serem ensaiadas, bem como a caracterização dos materiais empregados; (2) Etapa experimental composta por 7 vigas, 1 submetida a um ensaio rápido (monossinal) e as outras 6 foram sujeitas a diferentes carregamentos, onde, metade dessas foram também submetidas a aceleração da corrosão mediante aplicação de NaCl; (3) Análises dos deslocamentos das vigas, bem como a taxa de corrosão nos ensaios com aplicação de NaCl; (4) Simulações numéricas para avaliação da relação entre o dano e o avanço da corrosão. O fluxograma das atividades está sintetizado na Figura 9.



### 4.1 DEFINIÇÃO DAS VIGAS

#### 4.1.1 Dimensionamento e Concretagem

Uma vez que trata-se de ensaios não normalizados, as características

físicas das vigas foram ajustadas com base nas limitações para a sua realização, por exemplo, a aplicação dos carregamentos foi feita de forma manual e não automatizada, posto que se está trabalhando com corrosão e então é inviável a utilização de atuador mecânico devido ao risco de contaminação e consequente danificação dos demais equipamentos. Outro ponto é o fato desses ensaios demandarem longo período de tempo (aproximadamente 4 meses), e ao empregar vigas muito robustas seria necessário cargas substancialmente maiores para atingir os mesmos valores de danificação do que para vigas de seção transversal reduzida.

Assim sendo, optou-se pela utilização de vigas de seção quadrada (*i.e.*,  $b=h=7$  cm) com 2m de comprimento e, haja vista as pequenas dimensões, foi necessário maior cuidado em relação a estanqueidade das fôrmas. Para tal, foram confeccionadas 7 fôrmas em madeirite (Figura 10) e ainda, previamente à concretagem as faces internas das fôrmas foram forradas com papel contact a fim de obter um acabamento mais regular.

**Figura 10** – Fôrmas utilizadas para a concretagem.



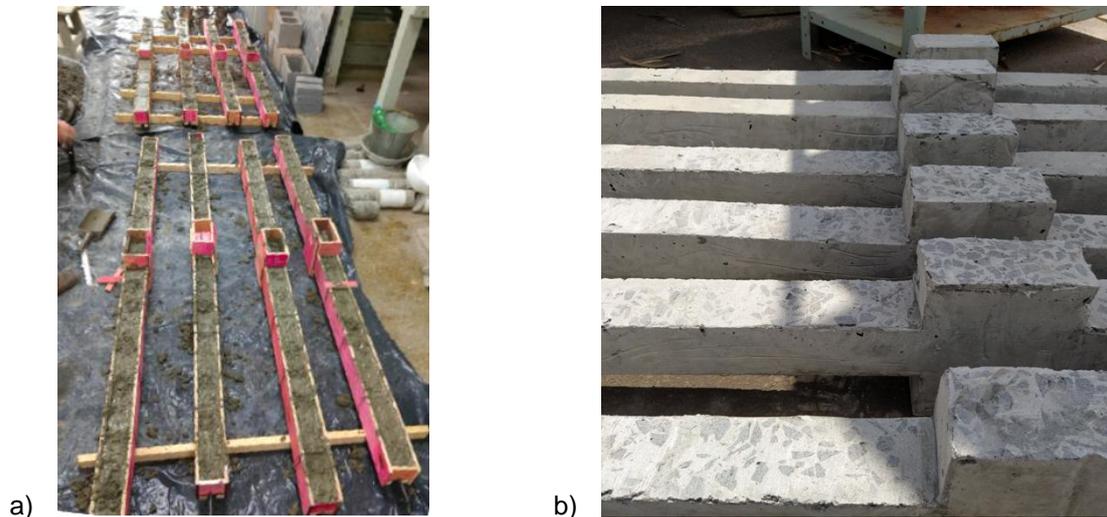
A areia empregada foi seca em estufa no dia anterior à concretagem e posteriormente foi separada e pesada, assim como os demais materiais (Figura 11). O traço utilizado para todas as vigas foi 1:3,17:3,71:0,65 com cimento CP V, areia fina, brita 1 e 0,5% de aditivo plastificante em relação à massa de cimento. Como pode ser observado na Figura 13 utilizou-se apenas uma armadura longitudinal positiva cujo diâmetro é de 6,3mm. Fez-se o uso de espaçadores que foram adaptados para garantir 1cm de cobertura da face inferior, já que assim a armadura fica bem próxima da face, facilitando a penetração por cloretos.

**Figura 11** – Materiais devidamente pesados.



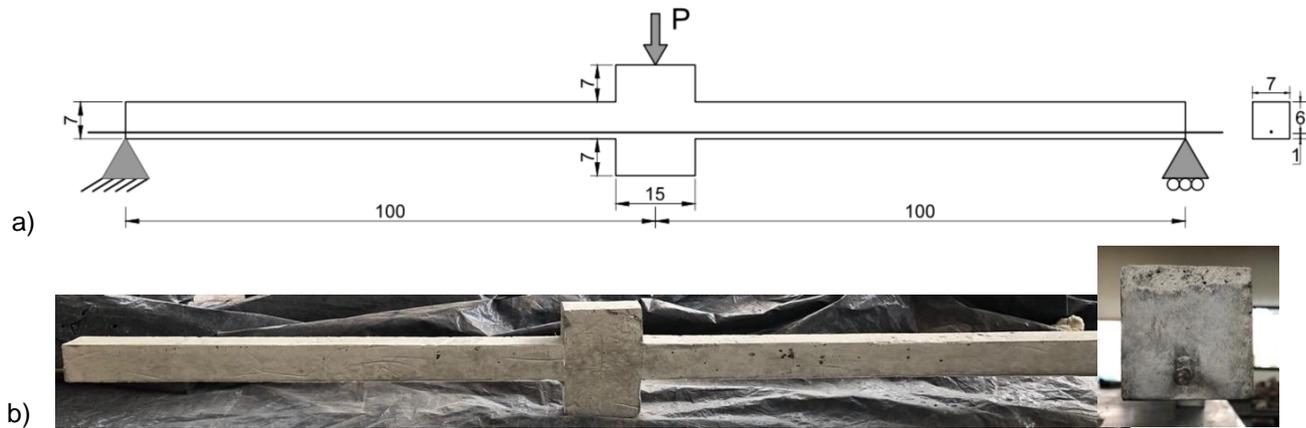
Para o adensamento do concreto foi utilizado vibrador a fim de que não surgissem vazios de concretagem, o que, prejudicaria o experimento uma vez que propiciaria a exposição das armaduras de aço. Ademais, após a concretagem fez-se a cura da forma convencional. Ao fazer a desmoldagem verificou-se irregularidades geométricas na face superior das vigas devido a baixa trabalhabilidade do concreto, dessa forma tornou-se necessário realizar o desbaste das vigas para que assim as dimensões que foram projetadas fossem atendidas da maneira mais rigorosa possível (Figura 12).

**Figura 12** – a) Moldagem das vigas. b) Vigas após o desbaste.



Nota-se que, para representar a interação viga pilar de uma estrutura convencional, o elemento apresenta maior seção transversal no centro (Figura 13). Além disso, de maneira intencional foram deixadas sobras da armadura nas extremidades da viga, visando a medição do Potencial de Corrosão para assim avaliar a corrosão da armadura no decorrer dos ensaios mistos.

**Figura 13** – a) Esquema das Vigas projetadas (dimensões em centímetros). b) Viga Finalizada.

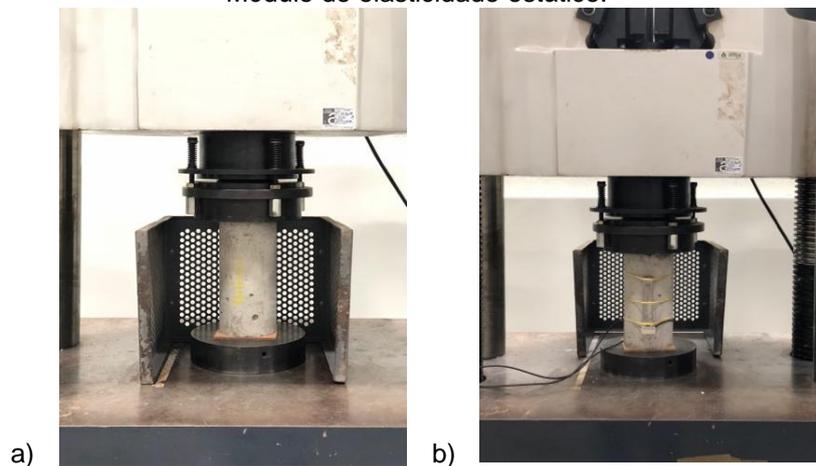


#### 4.1.2 Caracterização

Além da moldagem de 7 vigas, também foram preparados 12 corpos de prova cilíndricos de 10x20cm, moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), visando a caracterização do concreto utilizado, sendo realizados os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático, bem como, para uma primeira noção de como a solução de NaCl iria se comportar ao penetrar nas vigas, realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade. Ademais, no dia da concretagem fez-se o ensaio para determinar a trabalhabilidade do concreto de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

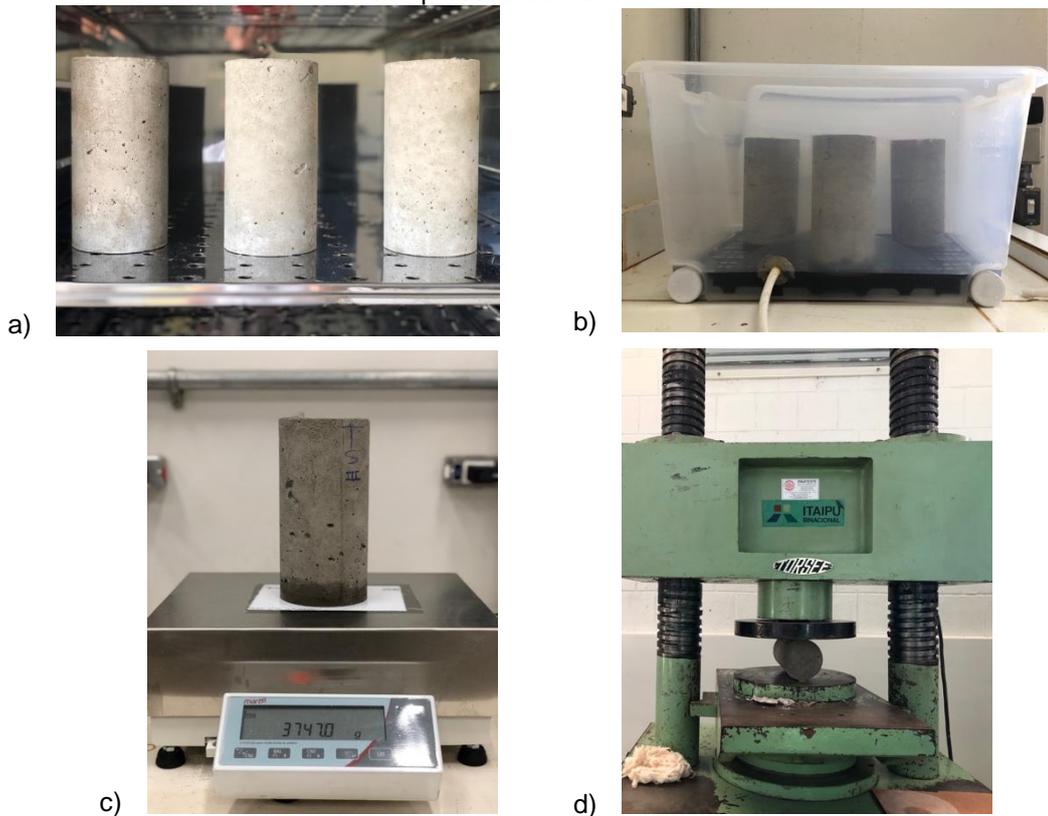
O ensaio de resistência à compressão (Figura 14a) foi realizado no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional (LTCl), conforme procedimento normativo da NBR 5739 (ABNT, 2018) assim como o ensaio de módulo de elasticidade estático (Figura 14b), o qual é regido pela NBR 8522 (ABNT, 2017).

**Figura 14** – CPs submetidos a compressão axial para determinação de: a) Resistência à compressão. b) Módulo de elasticidade estático.



Com relação à determinação da capacidade de absorção de água por capilaridade, seguiu-se as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2013). Neste ensaio, utilizou-se além da prensa do LTCI para o rompimento diametral dos corpos de prova, o Laboratório de Materiais da UNILA (LADEMA), onde foram realizados os demais processos do ensaio, como absorção de água, secagem e aferição da massa. Na Figura 15 tem-se algumas das etapas do procedimento realizado.

**Figura 15** – a) Secagem dos CP's em estufa. b) Absorção de água. c) Pesagem final. d) Rompimento à compressão diametral.



## 4.2 ETAPA EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Ensaio Monossinal

Esse primeiro ensaio era fundamental para avaliar o comportamento da viga projetada, sob efeitos unicamente provenientes da aplicação da carga vertical ( $P$ ) e o peso próprio, conforme mostrado anteriormente (Figura 13), e assim determinar os procedimentos seguintes. Previamente, foram calculados os valores teóricos dos momentos característicos, no caso do momento de fissuração, que se refere à passagem do comportamento da estrutura no estágio I para o II, utilizou-se a NBR 6118 (ABNT,

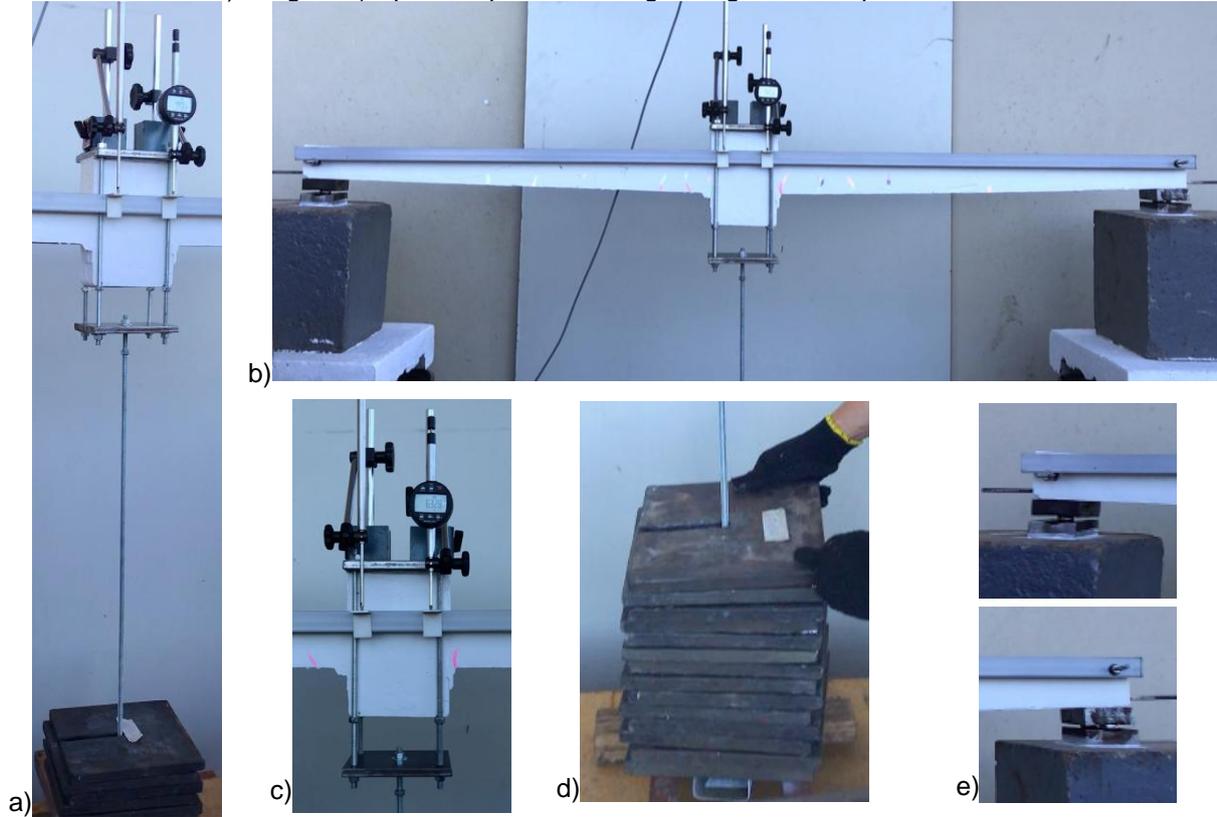
2014). Em relação ao momento plástico e último foram calculados com base na resistência da seção transversal projetada, levando em conta a deformação de início do escoamento do aço e a deformação última do concreto, respectivamente. Esses valores foram determinados para se obter uma estimativa das cargas que seriam aplicadas durante o ensaio.

O processo consistiu na aplicação e retirada sucessiva de carregamento. Iniciou-se com a aplicação de uma carga  $P$  (12,93kgf), na sequência retirou-se essa carga e incrementou-se agora uma carga de aproximadamente  $2P$  (27,44kgf), e, novamente, essa aplicação foi removida e o processo se repetiu com incremento de carga até que a viga chegou próximo ao colapso com um valor de aproximadamente  $15P$  (205kgf).

A viga ficou a uma altura de aproximadamente 150cm em relação ao piso, apoiada sobre rótulas metálicas de primeiro e segundo gênero (Figura 16). Na região central, montou-se um suporte com chapas de aço e hastes roscadas para viabilizar a inserção de carregamento por meio de cargas mortas. Ademais, em relação à colocação das cargas, fez-se de forma manual, entretanto, para a remoção dessas utilizou-se um transpalete hidráulico para levantar ao mesmo instante (e permanecer durante o tempo necessário) toda a carga já inserida, já que, a medida em que era feito o incremento, tornava-se mais difícil remover manualmente todo o peso de forma instantânea.

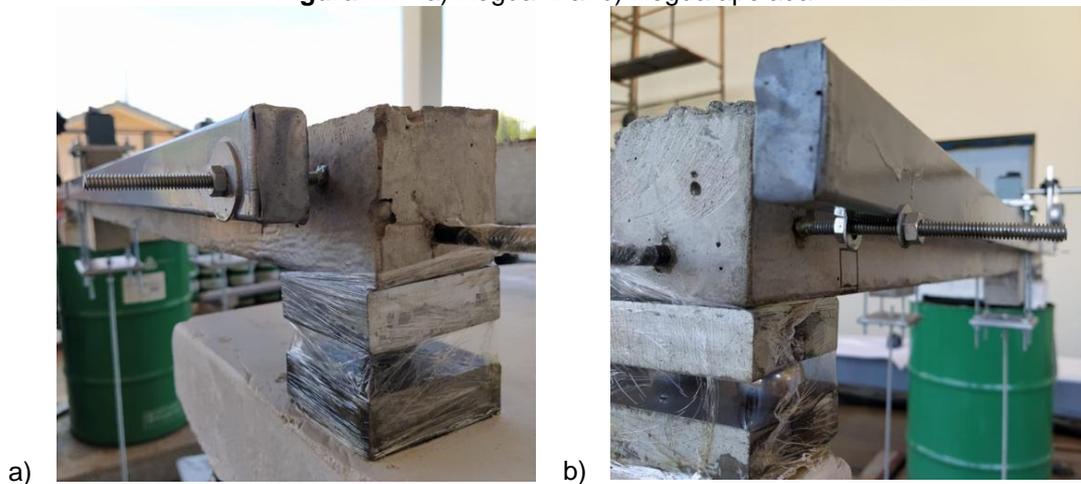
Durante o procedimento era necessário ter o controle dos deslocamentos verticais no centro da viga, dessa forma, foram instalados dois equipamentos, sendo um sensor linear de deslocamento (LVDT) e um relógio comparador digital (Figura 16c).

**Figura 16** – a) Sistema para acoplamento da carga. b) Conjunto completo (com o ensaio em andamento). c) Sistema de medição (da esquerda para a direita LVDT e relógio comparador digital). d) Cargas. e) Apoio de primeiro e segundo gênero, respectivamente.



Para atuar como um nível de referência, acoplou-se uma régua (Figura 17) que ficou fixa e apoiada por parafusos e porcas nas extremidades da viga. Assim, a medida em que a viga era carregada, essa sofria deslocamentos na vertical e a régua permanecia em nível, sendo assim, tinha-se os valores registrados para cada incremento de carga.

**Figura 17** – a) Régua fixa. b) Régua apoiada.



#### 4.2.2 Ensaio de Longa Duração - Mistos

Essa etapa demandou um longo período de tempo (aproximadamente 4 meses) e para ela foram necessárias um total de 3 vigas em uso simultâneo, onde cada uma recebeu um valor diferente de carga, além do peso próprio.

Esses valores de carga foram previamente determinados, utilizando os resultados do teste monossinal. Cada viga recebeu diferentes solicitações, mais especificamente, o que foi variado é a carga ( $P$ ) aplicada sobre o centro da viga, onde os três valores correspondem a valores superiores ao que provoca o momento de fissuração ( $M_r$ ). De forma crescente esses valores correspondem a 41,15kgf, 69,55kgf e 113,54kgf (Figura 18).

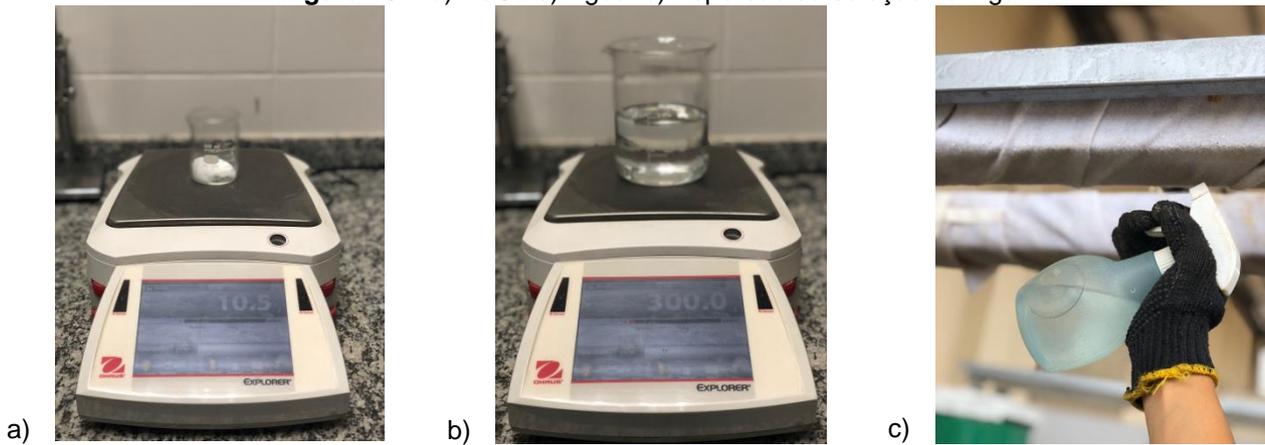
**Figura 18** – a) 41,15kgf. b) 69,55kgf. c) 113,54kgf.



Nessa etapa, além do dano mecânico, aplicou-se com o auxílio de um borrifador uma solução de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), objetivando a aceleração do fenômeno químico de corrosão nas armaduras de aço. Para essa solução definiu-se uma concentração de 3,5% (Figura 19), ou seja, para cada 100ml de água usou-se 3,5gr de  $\text{NaCl}$ , e sua aplicação se deu pela face inferior da viga, região a qual apresenta maior proximidade da armadura o que facilita o acesso e ação dos cloretos. Todo o processo de aspersão era realizado 3 vezes por semana.

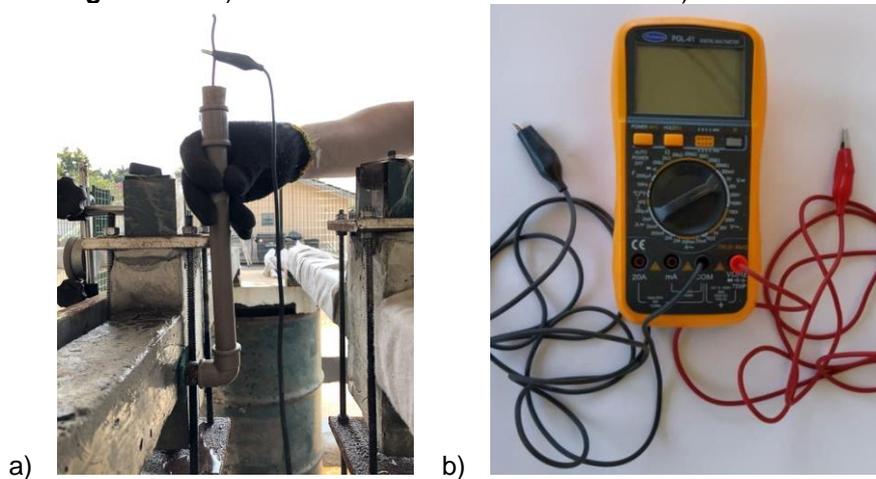
Para prolongar o tempo de umidade na viga, optou-se por enrolar as vigas com manta geotêxtil (bidim), alcançando dessa maneira fases mais simétricas de molhagem e secagem das vigas.

**Figura 19** – a) NaCl. b) Água. c) Aspersão da solução na viga.

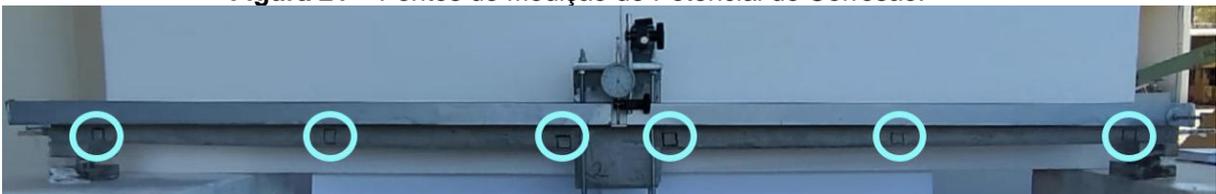


Para mensurar o potencial de corrosão utilizou-se um eletrodo de cobre/sulfato de cobre desenvolvido por Rupolo e Salgado (2019) (Figura 20a), e um multímetro (Figura 20b), este, era conectado ao eletrodo e ao extremo da armadura (Figura 13), e as leituras foram tomadas em 6 diferentes pontos laterais da viga em todo seu comprimento, como indicado na Figura 21.

**Figura 20** – a) Eletrodo de cobre/sulfato de cobre. b) Multímetro.



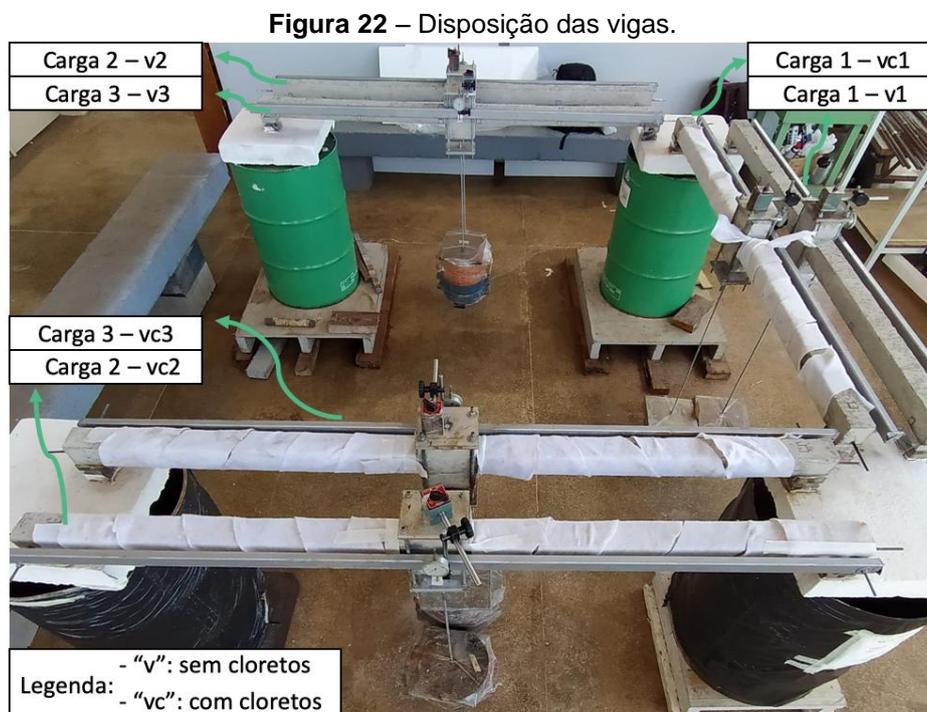
**Figura 21** – Pontos de Medição de Potencial de Corrosão.



#### 4.2.3 Ensaio de Longa Duração - Ação Única de Cargas

Para esse ensaio realizou-se o mesmo procedimento do item 4.2.2, ou seja, novamente utilizou-se 3 vigas e estas estiveram sob solicitação mecânica de 3 diferentes cargas (41,12kgf, 69,53kgf e 113,68kgf, nota-se uma pequena variação das cargas em relação às três vigas anteriores, isto se deve a disponibilidade das cargas). Salienta-se que, esta etapa foi realizada em simultâneo, haja vista que, a única diferença é que nesse procedimento não foi efetuado a aceleração do efeito corrosivo, já que, buscava-se criar vigas de referência a fim de comparar os deslocamentos das vigas sem corrosão com aquelas sujeitas à ação dos cloretos.

Assim sendo, montou-se um esquema de suporte para vigas, haja vista que, ao todo (item 4.2.2 e 4.2.3) foram 6 estruturas sendo solicitadas mecanicamente por um longo período de tempo em simultâneo, para tal utilizou-se tambores e blocos de concreto (Figura 22). Ademais, durante todo o procedimento foram coletados os valores de deslocamento no centro de todas as vigas por meio de relógios comparadores analógicos.



## 5 RESULTADOS

### 5.1 VERIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

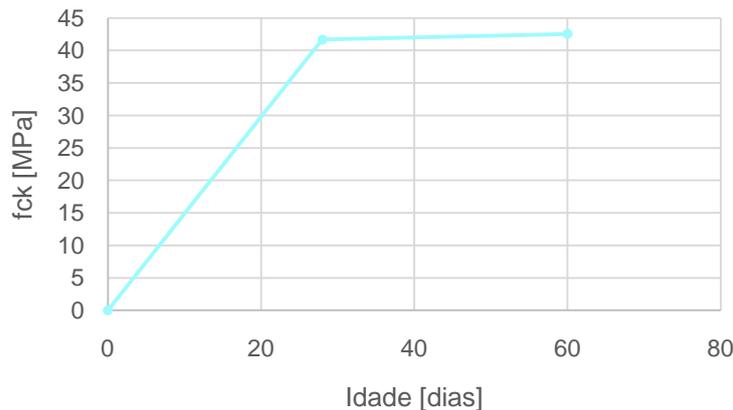
A trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi de 6,5 cm, já no estado endurecido a caracterização se deu pelos ensaios em 12 Corpos de Prova, os quais, foram divididos de acordo com a demanda para cada ensaio previsto (Tabela 2). O ensaio de Módulo de Elasticidade Estático foi realizado com 28 dias após a concretagem, o de Absorção de Água por Capilaridade foi realizado após 81 dias, já o ensaio de Resistência à Compressão foi realizado conforme as datas preconizadas na NBR 5739 (ABNT, 2018).

**Tabela 2** – Distribuição dos CPs por Ensaios.

Ensaios em CPs	Quantidade de CPs
Resistência à Compressão	6
Módulo de Elasticidade Estático	3
Absorção de Água por Capilaridade	3

Com relação ao ensaio de Resistência à Compressão os resultados obtidos ( $f_{ck}$ ) nas 2 datas estão indicados na Figura 23. Percebe-se que o ganho não foi muito elevado, obtendo-se como média resultante das duas idades 42,12 MPa.

**Figura 23** – Resistência à Compressão em função da idade.



Já os resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade Estático do concreto podem ser observados na Tabela 3. E por fim, apresentam-se os valores obtidos no Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade na Tabela 4.

**Tabela 3 – Módulo de Elasticidade Estático.**

<b>Amostra</b>	<b>E [GPa]</b>	<b>E médio [GPa]</b>
CP 3	35,31	34,33
CP 4	34,80	
CP 5	32,89	

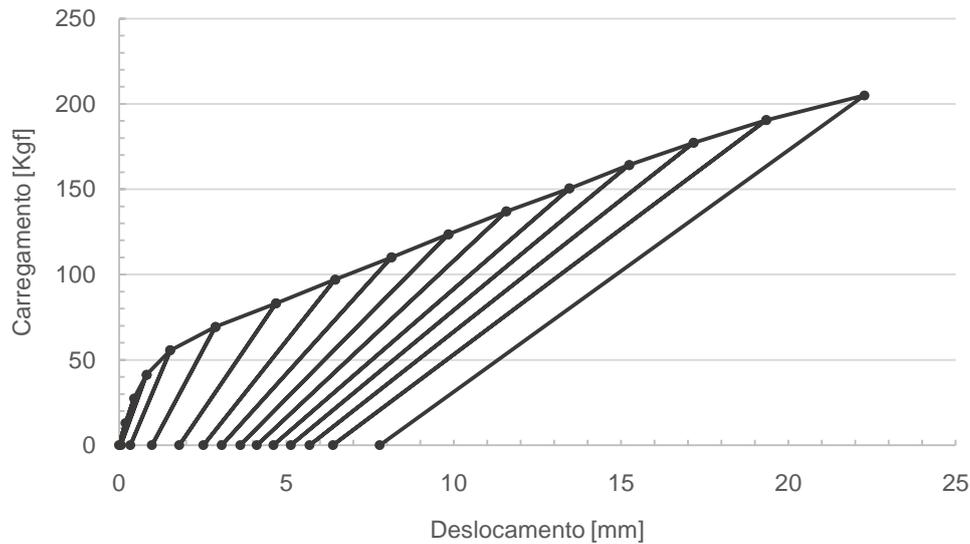
**Tabela 4 – Absorção de Água por Capilaridade.**

<b>Medições</b>	<b>Resultados</b>
Massa seca	3725,40 gr
Massa Saturada 3h	3736,30 gr
Massa Saturada 6h	3738,67 gr
Massa Saturada 24h	3745,73 gr
Massa Saturada 48h	3749,07 gr
Massa Saturada 72h	3750,50 gr
% de Absorção	0,67 %
Altura de Ascensão	3,95 cm

Observando a Tabela 4, nota-se que a altura de ascensão da água no concreto foi de 3,95cm, valor esse obtido pela média dos três CPs, ou seja, ainda que a metodologia para a realização desse ensaio difere-se da metodologia proposta para acelerar o processo corrosivo, pode-se afirmar que a porosidade do concreto empregado foi suficiente para garantir uma ascensão de no mínimo 1 cm, valor esse que foi definido no dimensionamento para o cobrimento da barra.

## 5.2 ENSAIO MONOSSINAL

Com a sequência de carregamentos e descargas detalhados anteriormente, teve-se como produto um gráfico de força *versus* deslocamento, teste monossinal (Figura 24). Esse processo provocou o surgimento do fenômeno de dano na estrutura em estudo, e o mesmo está localizado no centro da viga, haja vista que, nesse ponto tem-se o maior valor do momento fletor. Uma vez construído este gráfico e com a simplificação apresentada no item 3.3.1.1, foi possível identificar e quantificar a evolução da danificação ao longo do tempo, por meio dos valores resultantes nas descargas elásticas (que corresponde ao instante em que toda a carga é removida), bem como identificar os momentos: de fissuração, plástico e último.

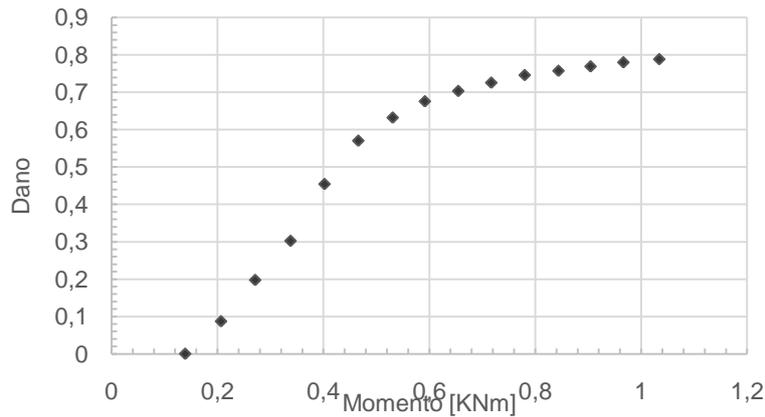
**Figura 24** – Gráfico que relaciona o processo de carga/descarga com os deslocamentos

Ao observar a Figura 24 nota-se alguns pontos característicos, como os valores de carregamento que provocaram: momento de fissuração, plástico e uma aproximação do momento último, isso porque, o ensaio foi finalizado ligeiramente antes do colapso da viga. Com esses valores de carga obteve-se então os resultados apresentados na Tabela 5. Ademais, percebe-se que a inclinação das retas está diminuindo conforme são realizadas novas descargas (Equação 43), o que é um indicativo da redução da rigidez da estrutura.

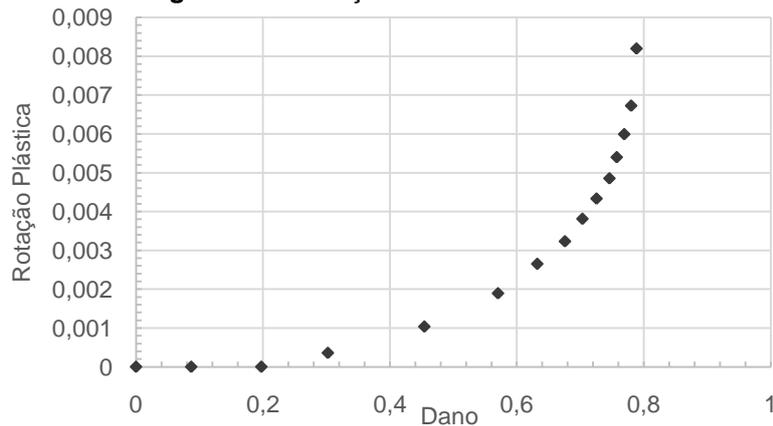
**Tabela 5** – Momentos Característicos.

	<b>Carga [kgf]</b>	<b>Carga [kN]</b>	<b>Momentos [kNm]</b>
Momento de Fissuração	27,44	0,27	0,21
Momento Plástico	55,61	0,54	0,34
Momento Último	205,00	2,01	1,03

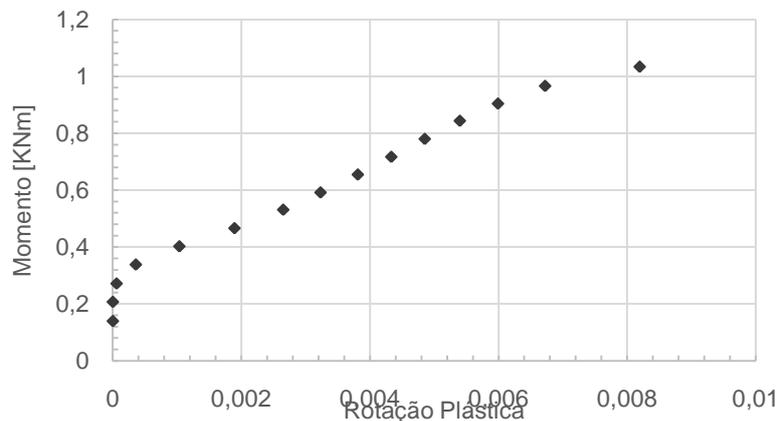
Utilizando a Equação 44 com os valores do Figura 24, foi possível verificar a evolução do dano a medida em que se incrementaram os momentos (Figura 25).

**Figura 25 – Momento versus Dano.**

Percebe-se pela Figura 26 que o surgimento da rótula plástica se deu no instante em que se tinha uma danificação de 0,3, valor esse que corresponde a uma carga de 55,61kgf que é aproximadamente o dobro da carga que gerou o início do dano (27,44kgf).

**Figura 26 – Rotação Plástica versus Dano.**

Ou ainda pode-se visualizar o início da plastificação em função do momento atuante (Figura 27).

**Figura 27 – Momento versus Rotação Plástica.**

### 5.3 ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO

#### 5.3.1 Avaliação da Corrosão

Nessa etapa estiveram sob avaliação 3 vigas submetidas ao processo de aceleração da corrosão em paralelo com outras 3 vigas sob as mesmas condições, entretanto sem aspersão de NaCl, conforme detalhado nos itens 4.2.2 e 4.2.3, respectivamente, e resumido na Tabela 6. Vale destacar que as cargas aplicadas estão aos pares para assim poder contrastar os efeitos da corrosão.

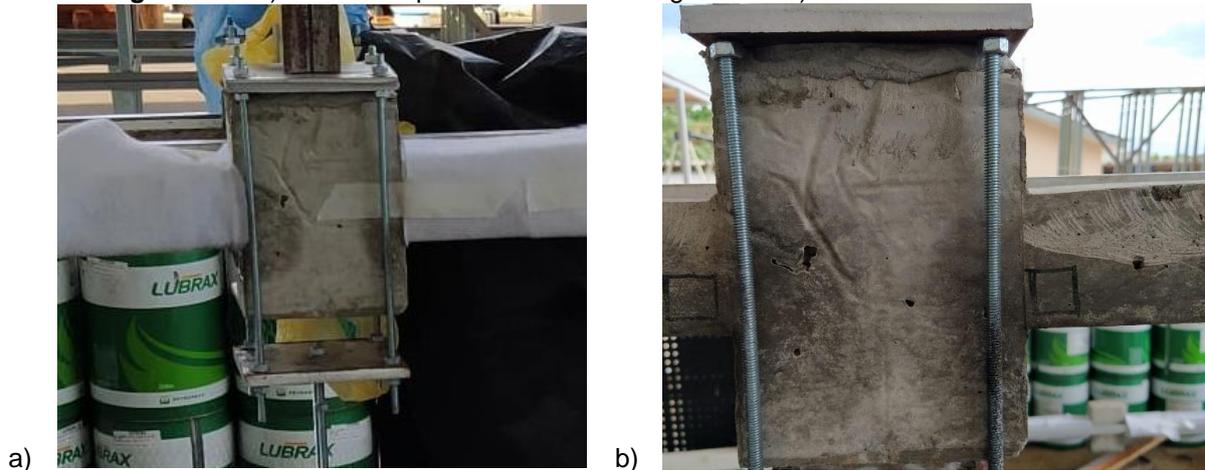
**Tabela 6** – Resumo das Vigas Ensaaiadas.

<b>Identificação</b>	<b>Carga [kgf]</b>	<b>Aspersão de NaCl</b>
v1	41,12	Não
v2	69,53	Não
v3	113,68	Não
vc1	41,15	Sim
vc2	69,55	Sim
vc3	113,54	Sim

Toda a montagem para a realização do ensaio experimental foi finalizada 95 dias após a concretagem das vigas. Entretanto, para melhor entendimento dos resultados, a contagem foi zerada e o dia 1 apresentado nos gráficos subsequentes são correspondentes ao dia em que foram aplicadas as cargas sobre cada uma das vigas e assim iniciado o experimento de longa duração.

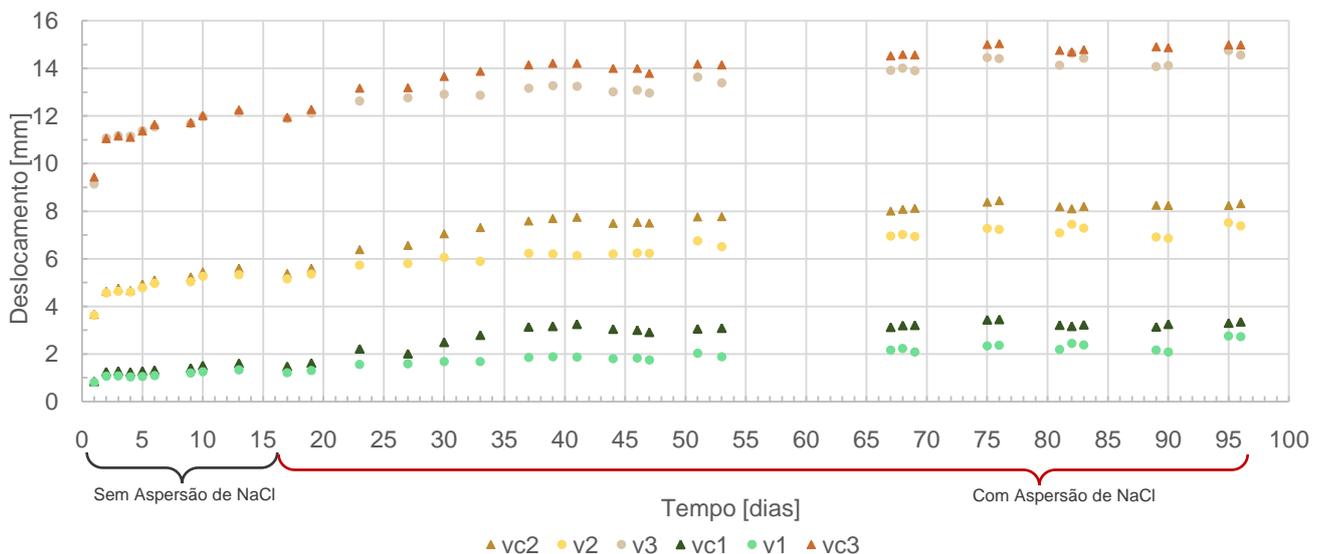
Passados 17 dias do carregamento das vigas iniciou-se o processo de aspersão de NaCl, o qual era realizado 3 vezes por semana somente na parte inferior da viga. Observa-se na Figura 28b a eficiência da presença da manta geotêxtil, uma vez que, após a retirada dela (28 dias depois da primeira aspersão de NaCl) é possível notar a diferença na coloração da viga devido à presença de umidade. Sendo assim, tomando como base as imagens e o trabalho apresentado por Burigo (2017), onde indica maior facilidade para penetração de íons cloreto quanto maior a relação água/cimento e também no comparativo o concreto realizado com cimento CP V apresentou maior presença de cloretos, pode-se afirmar então que os agentes agressivos estão ingressando até na armadura.

**Figura 28** – a) Umidade aparente sob a manta geotêxtil. b) Umidade remanescente.



Com relação aos registros de deslocamentos, tem-se na Figura 29 todos deslocamentos coletados tanto para as vigas sem corrosão quanto com corrosão, totalizando 96 dias de observação<sup>1</sup>. Fica evidente o período em que se iniciou o processo de aspersão de NaCl, dado que, a partir da data inicial até a data 19 percebe-se o comportamento praticamente igual para os pares de viga, todavia, após esse período os registros começam a se distanciar.

**Figura 29** – Deslocamentos das vigas com e sem corrosão.

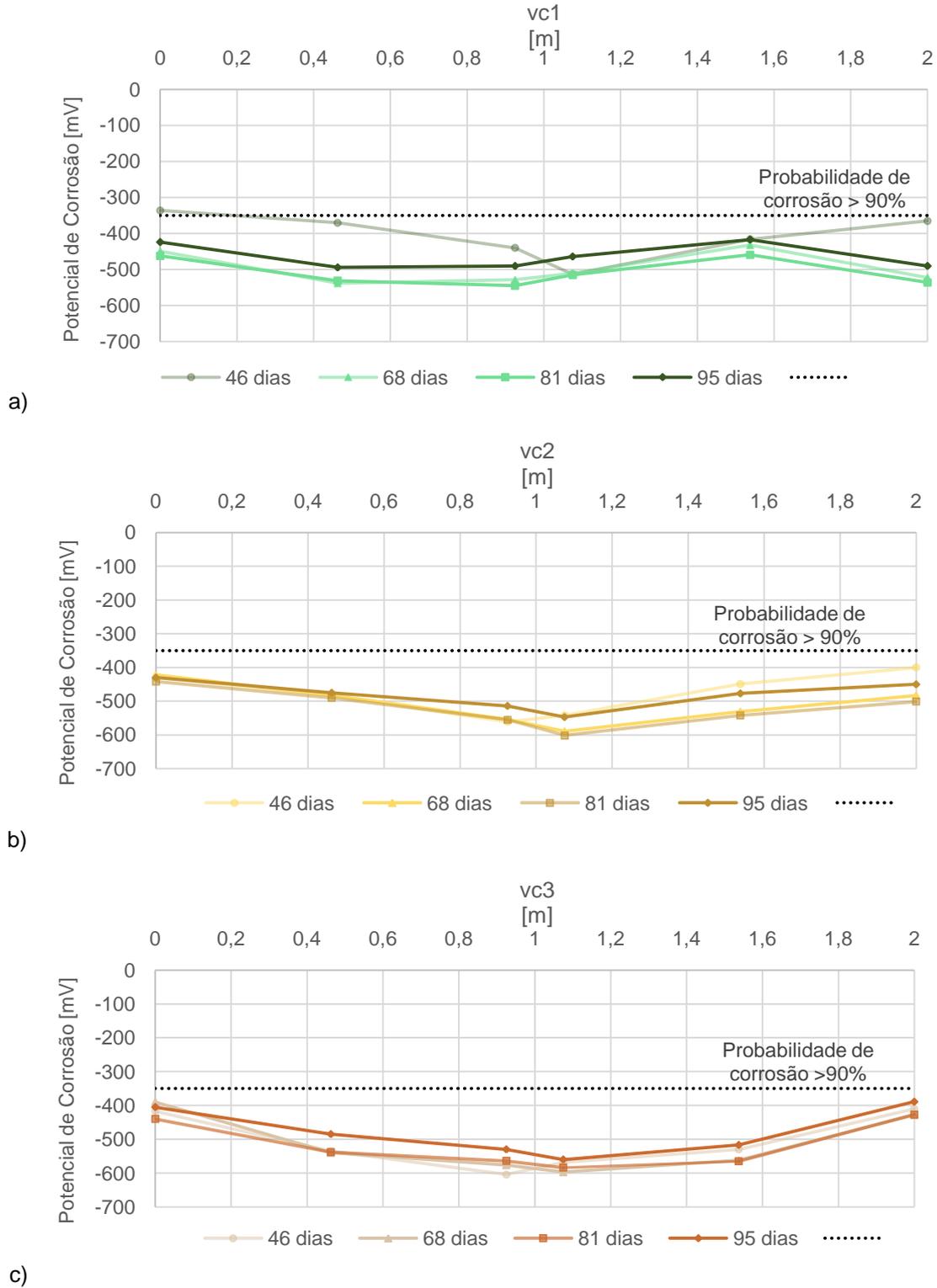


Além dos deslocamentos foram coletados também os valores de potencial de corrosão (Figura 30). Essas leituras foram realizadas na face lateral da viga em 4

<sup>1</sup> No período compreendido entre as datas 53 e 67 não houve coleta de dados, entretanto, o processo de aspersão de NaCl foi realizado normalmente.

datas, sendo que a primeira delas foi no dia 46, ou seja, 29 dias após a primeira aspersão de agente agressivo.

**Figura 30** – Leituras de Potencial de Corrosão. a) Viga menos carregada. b) Viga intermediária. c) Viga mais solicitada.



Observando a Figura 30a percebe-se que apenas a primeira leitura (dia

46) apresentou um valor menos eletronegativo que  $-350$  mV, sendo assim, tem-se de acordo com a C876 (ASTM, 2015) (Tabela 1 deste trabalho) uma probabilidade incerta de haver corrosão.

No entanto, observando as leituras da mesma data (46) para as demais vigas (Figuras 30b e 30c), todas apresentaram leituras mais eletronegativas que  $-350$  mV e estas leituras seguiram o mesmo padrão nas três datas seguintes. Percebe-se ainda que a viga vc1 também passou a apresentar leituras mais eletronegativas a partir da segunda coleta do potencial de corrosão.

Salienta-se que não houve alteração na dosagem da solução de cloretos que foi aspergida nas vigas, o mesmo teor de concentração foi empregado em todos os processos, ou seja, nenhum aumento ou redução. Ainda pela Figura 28, foi possível garantir a presença de períodos úmidos mais prolongados nas vigas obtendo-se então um tempo maior para a solução alcançar a armadura.

Outro resultado a ser observado na Figura 30, especificamente para as vigas mais carregadas (vc2 e vc3) são as tendências de as maiores leituras de potencial de corrosão estarem localizadas na região central das vigas. Sabe-se que, devido ao esquema estrutural das vigas ensaiadas os maiores valores de momento estão justamente na região central da viga, ou seja, por consequência tem-se ali as maiores fissurações e, de acordo com os autores Otieno, Alexander e Beushausen (2010), a abertura de fissuras influencia diretamente no fenômeno corrosivo, incrementando-o.

Para o caso da Figura 30a como o valor da carga aplicada é baixo tem-se menos aberturas de fissuras na região central da viga, e assim a tendência nas leituras de potencial de corrosão foram menos evidentes.

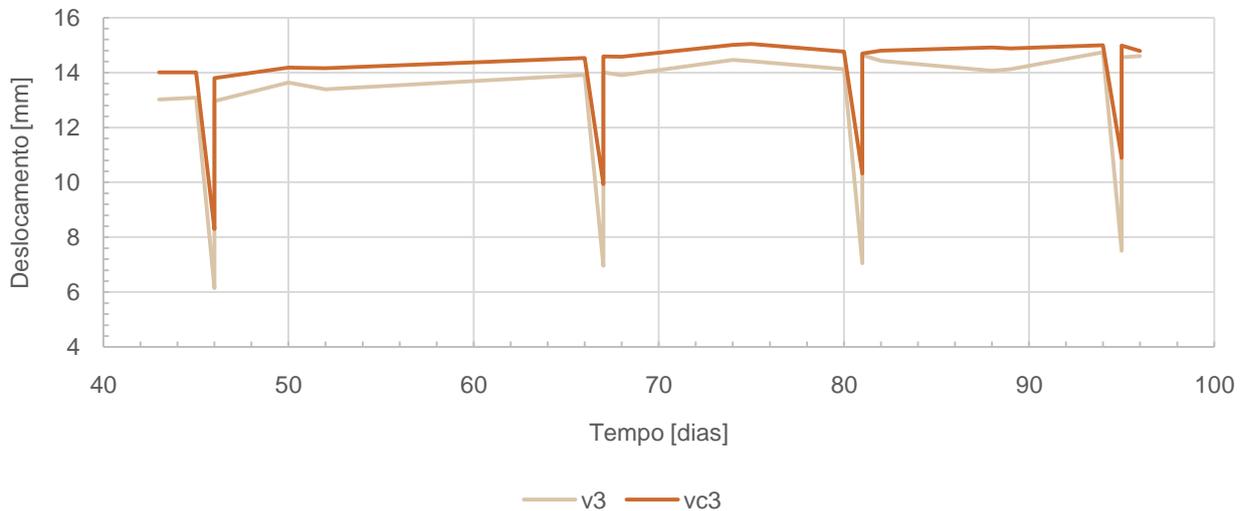
### 5.3.2 Danificação Mecânica

Durante a execução dos ensaios, foram realizadas as descargas elásticas, removendo-se quase de forma instantânea todo carregamento e posterior recarga. Com os dados de deslocamento desse procedimento foram confeccionadas as Figuras 31 e 32. Esse processo foi realizado em 4 datas (46, 67, 81 e 95).

Percebe-se na Figura 31 que a medida em que são realizadas novas descargas nas vigas a amplitude dos deslocamentos indicados, ou seja, o deslocamento elástico da viga com corrosão (vc3) passa a diminuir, o que aponta o aumento dos

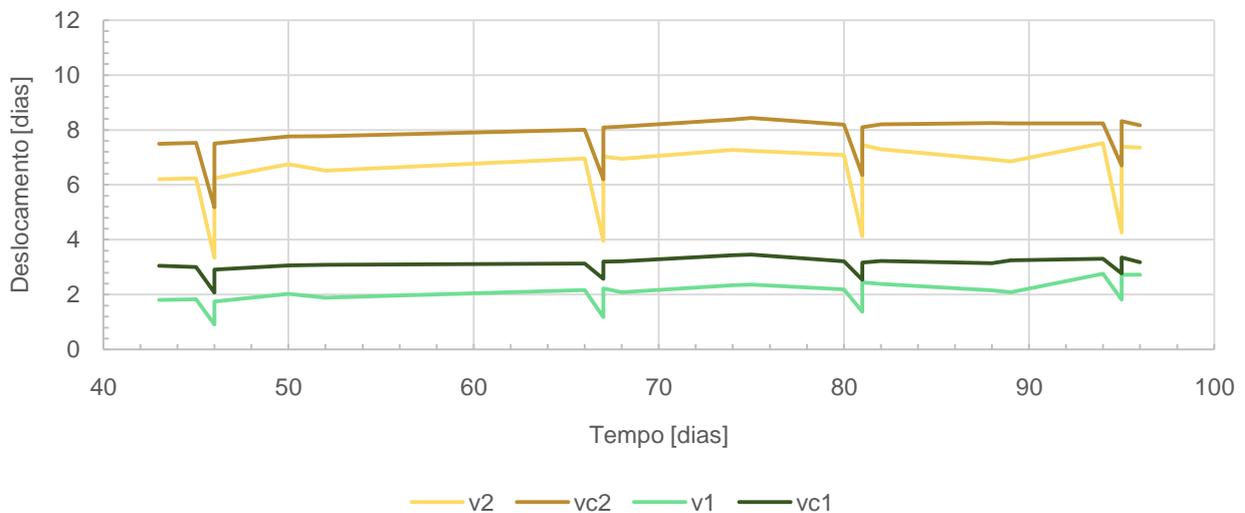
deslocamentos permanentes, fato esse que é praticamente desprezível se estamos falando da viga sem corrosão (v3).

**Figura 31** – Deslocamentos das vigas com e sem corrosão.



Situação semelhante ocorre ao observar a Figura 32, entretanto, as amplitudes aqui são bem menores que na Figura 31, isso porque temos cargas reduzidas e conseqüentemente fica menos evidente a redução das amplitudes. Contudo, pode-se afirmar que essas reduções são geradas devido ao aumento dos deslocamentos permanentes, ou seja, tem-se redução na resposta elástica e por conseqüência menor rigidez da estrutura.

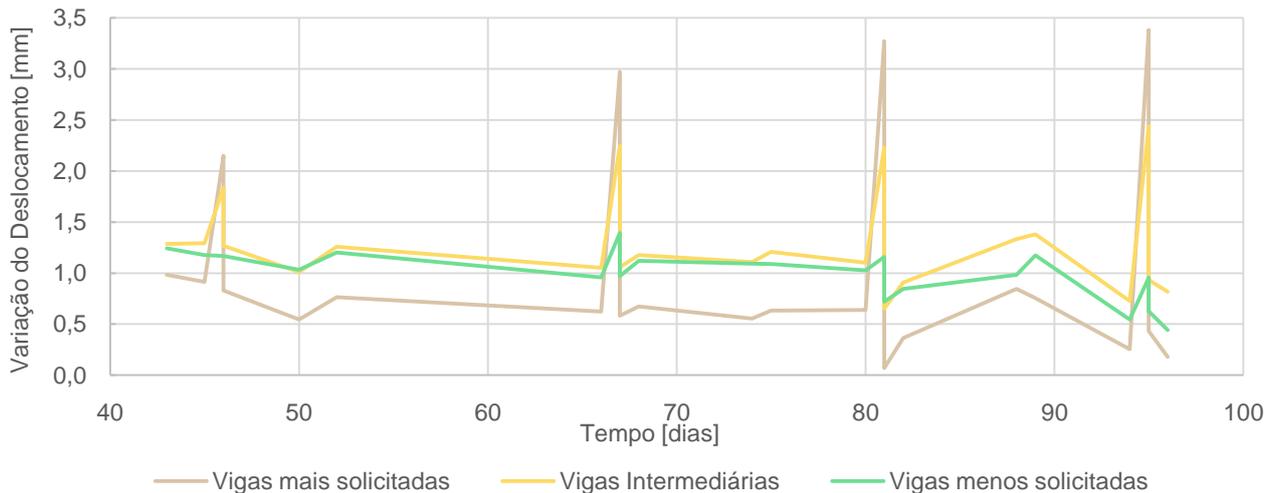
**Figura 32** – Deslocamentos das vigas com e sem corrosão.



A tendência observada anteriormente fica ainda mais notória com os

dados apresentados como variação de deslocamentos entre as vigas de referência (sem corrosão) em relação àquelas sob aceleração da corrosão (Figura 33), já que é possível observar o aumento diferença entre os deslocamentos, em especial, para as vigas com maiores valores de carga.

**Figura 33** – Variação dos deslocamentos entre vigas com e sem corrosão.



Com base no indicativo da Figura 33, bem como o estudo desenvolvido por Du, Clark e Chan (2005) em que se evidencia a penalização da tensão de escoamento das armaduras presentes no concreto. Ademais, dos resultados obtidos por Maaddawy, Soudki e Topper (2005), onde, verificou-se a redução da resistência de estruturas de concreto armado sob corrosão, as quais foram incrementadas devido à abertura de fissuras proveniente de cargas aplicadas sobre o elemento estrutural, pode-se então atestar a influência do ingresso de cloretos no comprometimento da resposta estrutural, especialmente pela redução na ductilidade.

### 5.3.3 Simulações Numéricas

Utilizando as formulações apresentadas anteriormente, juntamente com os dados que foram sendo coletados durante todo o desenvolvimento experimental tornou-se possível a implementação no software ©Maplesoft e posterior obtenção dos resultados numéricos que são detalhados no que segue.

Inicialmente, empregando o equacionamento apresentado em 3.3 e um processo de *updating*, por meio do método dos mínimos quadrados, realizou-se um

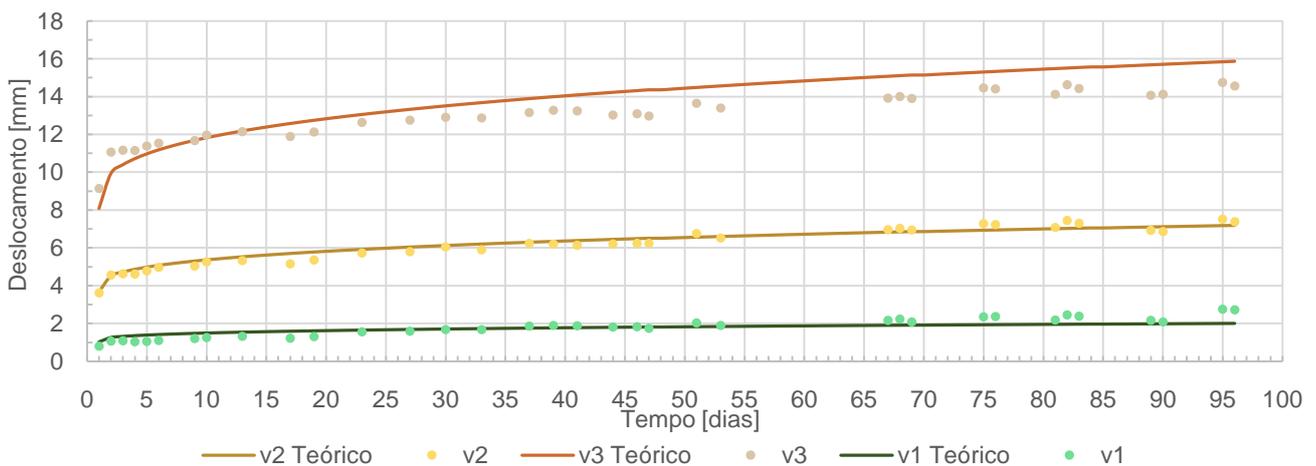
processo iterativo até encontrar maior compatibilidade dos resultados com os dados experimentais. Sendo assim, com os deslocamentos iniciais das vigas do ensaio de longa duração (sem corrosão) tem-se na Tabela 7 os valores estimados de momentos e rigidez da estrutura. Salienta-se que o erro da aproximação é desprezível, uma vez que, o valor foi de  $1,31E^{-16}$  e os deslocamentos são provenientes do ensaio de longa duração (5.3.2) e não do ensaio monossinal em (5.2).

**Tabela 7** – Resultados obtidos por meio de processo iterativo.

Identificação	Resultados <i>Updating</i>
Momento Plástico [KNm]	0,28
Momento Último [KNm]	1,56
Rotação Plástica Última	0,0647
Rigidez EI [Nm <sup>2</sup> ]	95,00

Posteriormente, com a rigidez obtida foi possível simular o comportamento das 3 vigas sem corrosão ao longo do tempo e compará-las com os dados coletados (Figura 34), levando em conta a formulação apresentada no item 3.4 e contemplando ainda o efeito de fluência determinado pela Equação 8. Nota-se que, a curva da viga intermediária (v2 Teórico) apresentou uma ótima correlação, enquanto as demais apresentaram também valores próximos mas com uma variabilidade na região final.

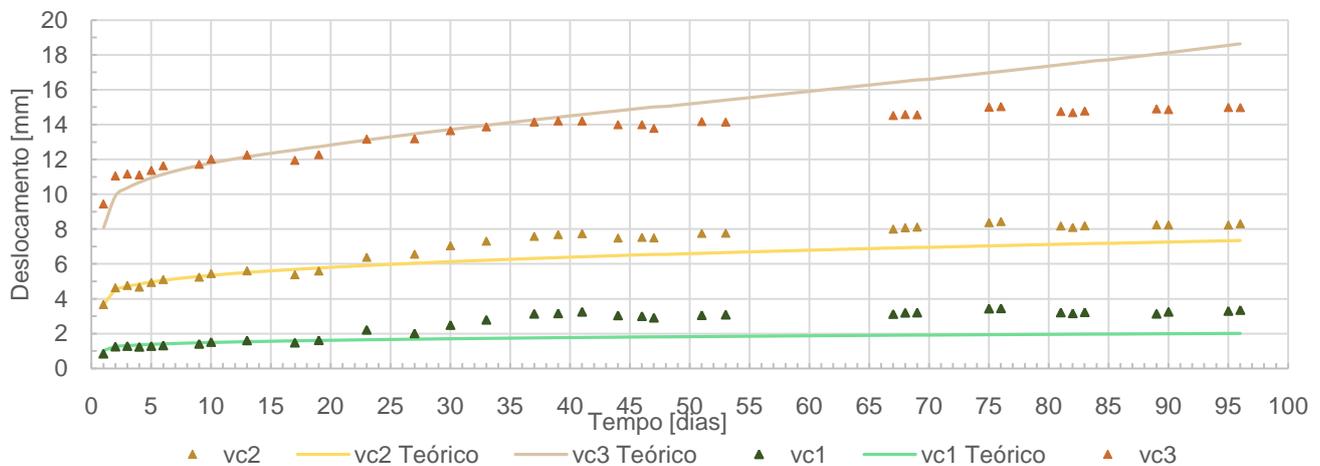
**Figura 34** – Deslocamentos ao longo do tempo das vigas sem corrosão.



De forma similar, porém agora contemplando os efeitos da corrosão (Figura 35), tornou-se possível comparar os dados das vigas sujeitas ao processo corrosivo com os resultados provenientes do equacionamento baseado na termodinâmica

de pórticos (item 3.4) e também com a consideração da fluência (item 3.2).

**Figura 35** – Deslocamentos ao longo do tempo das vigas com corrosão.



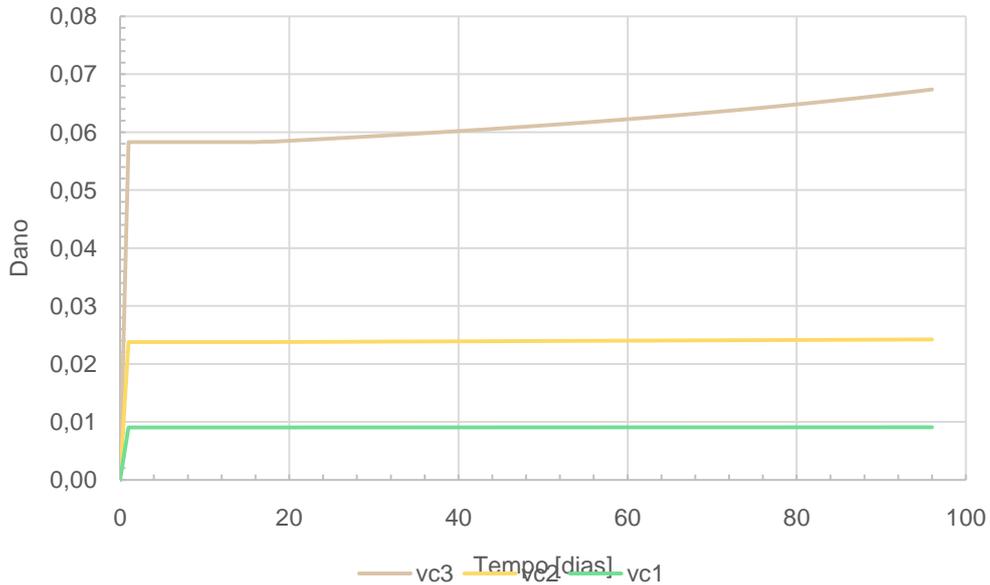
Analisando a Figura 35 observa-se que, embora para as vigas menos solicitadas (vc1 Teórico e vc2 Teórico) atingiu-se uma boa aproximação, já na vc3 Teórico, principalmente após o dia 55, nota-se uma disparidade entre os deslocamentos obtidos pela simulação em relação aos coletados. Entretanto, é importante lembrar que para simular o ambiente de agressividade foi necessário realizar processos de aspersão de NaCl nas vigas, ou seja, as vigas sob processo corrosivo apresentam por consequência elevados valores de umidade se contrastadas com as vigas referências (sem corrosão). Esta umidade pode justamente afetar a fluência, como afirma Poletto (2015), e também como demonstrado por Carbonari, Santos e Toralles-Carbonari (2004), onde, foram analisadas ao longo do tempo vigas com diferentes tipos de impermeabilização e percebeu-se que as vigas seladas (sem perda de água para o ambiente), apresentaram menores deformações para um mesmo concreto e carregamento, devido ao fato da água presente nos poros do concreto ser incompressível.

Sendo assim, pode-se afirmar que a umidade nas vigas com corrosão atuou reduzindo os efeitos de fluência, inibindo dessa forma um aumento mais pronunciado dos deslocamentos, e esse efeito da umidade sobre o coeficiente de fluência que foi utilizado nas simulações numéricas não é contemplado na Equação 8.

Finalizadas as comparações com os dados experimentais, passou-se a avaliar as variáveis do modelo teórico empregado, ou seja, verificamos o surgimento de dano (Figura 36) para as três estruturas já no momento da aplicação da carga, uma vez que, o momento impulsionador do dano se igualou ao valor da resistência inicial à fissuração do concreto (Equação 57) e acompanhou-se a evolução até a data em que

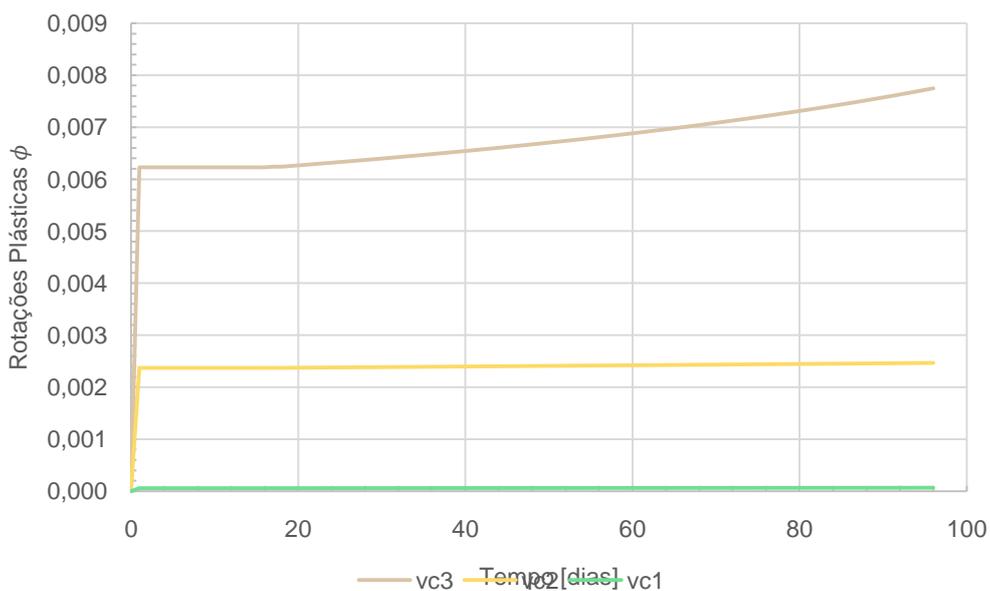
foram coletados dados.

**Figura 36 – Evolução do Dano.**



O mesmo ocorreu para a rotação plástica (Figura 37), teve-se o surgimento dessa também na aplicação do carregamento (dia 1), entretanto, são valores basicamente desprezíveis para a viga menos solicitada (vc 1). Mas é importante notar que após a data 20 tem-se uma alteração na intensidade da evolução das variáveis, tanto para o Dano (Figura 36) quanto para as rotações plásticas (Figura 37).

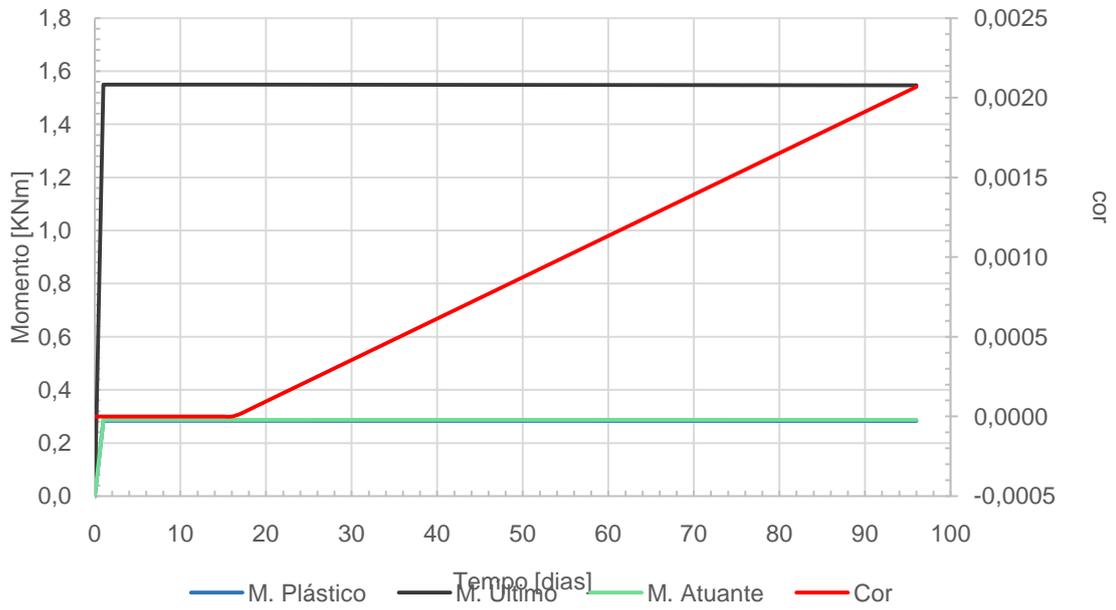
**Figura 37 – Evolução da Rotação Plástica.**



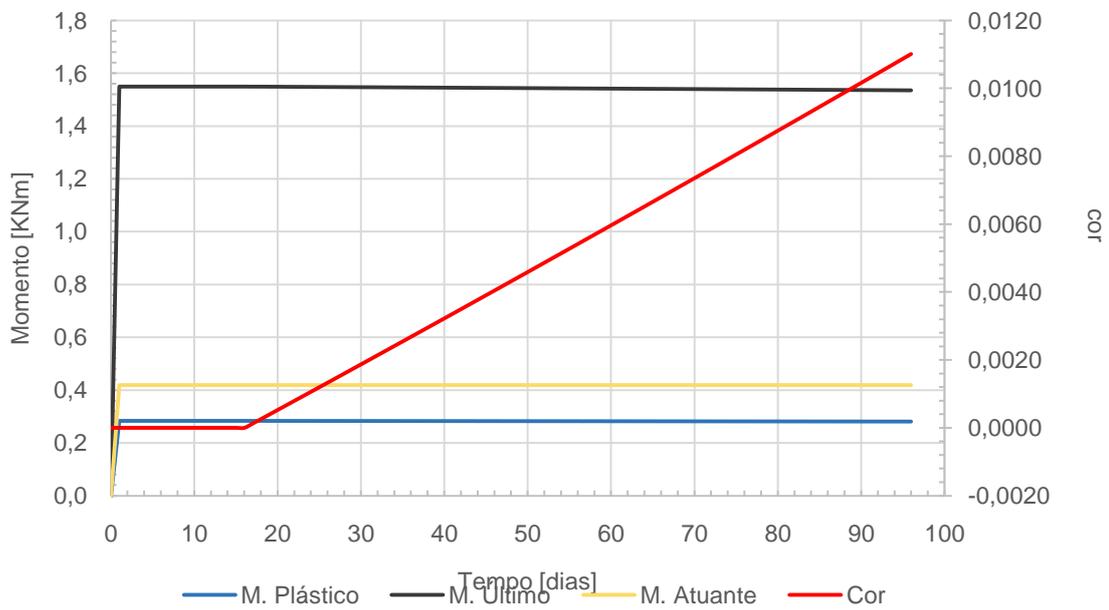
Outra análise realizada foi o acompanhamento da penalização dos momentos resistentes conforme a evolução dos níveis de corrosão, os quais podem ser

observados nas Figuras 38, 39 e 40.

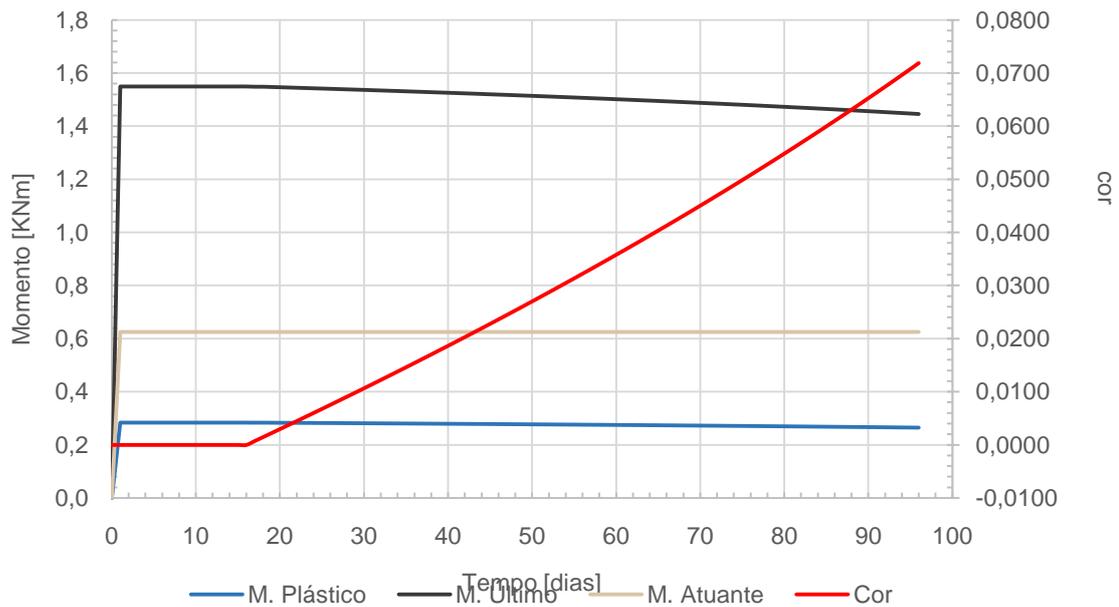
**Figura 38** – Penalização dos Momentos com a evolução da corrosão (vc1).



**Figura 39** – Penalização dos momentos com a evolução da corrosão (vc2).



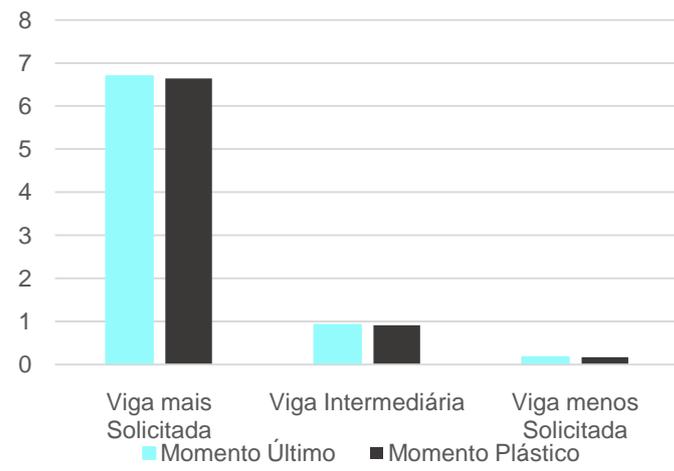
**Figura 40** – Penalização dos Momentos com a evolução da corrosão (vc3).



Nas três simulações acima (Figuras 38, 39 e 40), tem-se a indicação dos momentos plásticos (azul), último (cinza) e atuante (verde, amarelo e bege) devido à carga pontual aplicada no centro das vigas bem como devido ao peso próprio.

Primeiro ponto a ser observado é que de fato por meio das curvas é visível a redução dos momentos resistentes, ainda que sejam valores não muito elevados. Seguidamente observa-se que, os resultados mais significativos foram àqueles provenientes da viga cuja carga aplicada era maior (vc3). Na Figura 41 tem-se a porcentagem de penalização para cada uma das vigas, onde fica mais evidente a relação da abertura de fissuras na evolução da corrosão e conseqüente redução dos momentos, uma vez que, no caso da viga mais solicitada teve-se uma redução de 6,7% no valor do momento último, enquanto para a menos solicitada essa redução foi de apenas 0,17%, lembrando que essa avaliação foi realizada para o mesmo intervalo de tempo dos gráficos anteriores (96 dias).

Ademais, ainda na Figura 39, percebe-se que a partir do dia 60 a característica antes predominantemente “reta” da curva de níveis de corrosão passa a ser alterada indicando uma tendência de evolução da corrosão ainda maior para um mesmo intervalo de tempo, ou seja, nota-se que a própria evolução da fissuração passa a contribuir no incremento da corrosão e essa acentuação é percebida por conseqüência também na curva do Momento Último.

**Figura 41 – Porcentagem de Penalização dos Momentos.**

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a elaboração do presente trabalho foi possível contrastar dados experimentais do comportamento de vigas sujeitas a efeitos mecânicos e químicos frente à resultados de simulações numéricas baseadas na Teoria do Dano Concentrado, e ainda em relação aos resultados, podem ser ressaltados alguns pontos:

- A partir dos ensaios com aspensão de NaCl verificou-se que a metodologia experimental desenvolvida para acelerar o processo corrosivo mostrou-se eficiente uma vez que todas as vigas submetidas ao processo atingiram porcentagens superiores a 90% de probabilidade de estarem sob efeitos da corrosão. Ainda, os maiores valores de potencial corrosivo detectados foram na região central da viga, como esperado, uma vez que trata-se da região onde o momento possuía seu valor máximo e conseqüentemente também os maiores valores de danificação. Tal situação leva a maiores aberturas de fissuração, propiciando a entrada de oxigênio e favorecendo assim a ação dos íons cloretos. Ademais, também com base nos valores de carga aplicadas, identificou-se que a intensidade da evolução da corrosão está diretamente ligada com os níveis de solicitações mecânicas.

- Constatou-se que a evolução do dano e da rotação plástica, variáveis definidas na Mecânica do Dano Concentrado, passaram a incrementar assim que houve presença de corrosão, variável a qual foi adicionada por meio da Termodinâmica de Pórticos, e também com o incremento dessas variáveis mecânicas houve interferência na taxa de corrosão, aumentando a evolução da corrosão com o aumento da danificação da estrutura, conseqüência esta, refletida em especial pelos valores de momentos.

- Quanto à penalização nas estruturas ensaiadas, verificou-se que os deslocamentos permanentes das estruturas expostas ao ambiente de alta agressividade passaram a aumentar ao longo de tempo se comparado às vigas sem degradação, indicando a redução da rigidez das estruturas devido a presença de corrosão.

- A partir da coleta dos dados experimentais, do modelo teórico empregado e da inserção do coeficiente de fluência no modelo para análise temporal, tornou-se possível estimar os valores de deslocamentos, tanto para vigas não degradadas quanto para àquelas sob corrosão, ou seja, simular o comportamento estrutural considerando o acoplamento corrosão-fissuração.

Por fim, ressalta-se que o estudo desenvolvido é de caráter precursor, sendo assim, a fim de obter maior representatividade, faz-se necessário a elaboração de

um maior número de experimentos para significância estatística. Ademais, para a realização de trabalhos futuros recomenda-se trabalhar com vigas de referência também sob umidade, além de contar com equipamentos que permitam o acompanhamento da intensidade de corrosão nas vigas em laboratório, o que facilitaria o acompanhamento quantitativo da evolução do processo corrosivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: [s.n.], 1998.
- ABNT. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.
- ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.
- ABNT. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.
- ABNT. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017.
- ABNT. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.
- ASTM. **ASTM C876**: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. West Conshohocken (EUA): [s.n.], 2015.
- BARONI, H. J. M. **Avaliação do comportamento dos deslocamentos transversais ao longo do tempo em vigas de concreto armado não convencional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: [s.n.], 2003.
- BERTOLINI, L. et al. **Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair**. [S.l.]: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2004.
- BRANT, C. A. C. **Formulação termodinâmica do acoplamento corrosão-fissuração em estruturas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu.: [s.n.], 2019.
- BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair**. 2. ed. Nova York: Taylor & Francis, 2006.
- BURIGO, G. M. **Estudo sobre o efeito da difusão de cloreto no concreto com alteração na relação água /cimento e no tipo de cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça: [s.n.], 2017.
- CAO, C.; CHEUNG, M. M. S. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures. **Construction and Building Materials**, Hong Kong, n. 51, p. 75-81, 2014.

CARBONARI, G.; SANTOS, A. C. P. D.; TORALLES-CARBONARI, B. M. **Impacto estrutural do tipo de selagem externa nas deformações fluência de vigas de concreto armado**. XXXI JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL. Anais. Mendoza (ARG): [s.n.], 2004.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. D. F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 3a. ed. São Carlos: EdUFSCar: [s.n.], 2007.

CIPOLLINA, A.; LÓPEZ-INOJOSA, A.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames. **Computers and Structures**, Mérida, v. 54, p. 1113-1126, 1995.

COELHO, K. O. **Modelos numéricos aplicados à modelagem probabilística da degradação mecânica do concreto e corrosão de armaduras**. São Carlos: USP: [s.n.], 2017.

CUSSON, D.; LOUNIS, Z.; DAIGLE, L. Durability Monitoring for Improved Service Life Predictions of Concrete Bridge Decks in Corrosive Environments. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, Ottawa, n. 26, p. 524-541, 2011. ISSN DOI: 10.1111/j.1467-8667.2010.00710.x.

DAHMER, R. R. **Modelos para análise de estruturas submetidas a solicitações químico-mecânicas**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu.: [s.n.], 2018.

DU, Y. G.; CLARK, L. A.; CHAN, A. H. C. Residual capacity of corroded reinforcing bars. **Magazine of Concrete Research**, Edinburgh, v. 57, n. 3, p. 135-147, April 2005.

ELSENER, B. et al. Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. **Materials and Structures**, August-September 2003. 461-471.

FATTORELLI, S.; FERNÁNDEZ, P. C. **Diseño Hidrológico**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

FLÓREZ-LÓPEZ, J.; MARANTE, M. E.; PICÓN, R. **Fracture and Damage Mechanics for Structural Engineering of Frames: State-of-the-Art Industrial Applications**. [S.l.]: IGI Global, 2015.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.: [s.n.], 1996.

GILBERT, R. I. Shrinkage, Cracking and Deflection-the Serviceability of Concrete Structures. **Electronic Journal of Structural Engineering**, Sidney, 2001.

HUNKELER, F. **Corrosion in reinforced concrete structures**. Cambridge: [s.n.], 2005. 1-55 p.

JEDIDI, M.; BENJEDDOU, O. Chemical Causes of Concrete Degradation. **MOJ Civil Engineering**, v. 4, 2018.

KACHANOV, L. M. On creep rupture time. **Izv. Akad. Nauk. SSSR** 8, 1958. 26-31.

KEARSLEY, E.; JOYCE, A. Effect of corrosion products on bond strength and flexural behaviour of reinforced concrete slabs. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering.**, Pretoria, v. 56, n. 2, p. 21-29, August 2014.

KIVELL, A.; PALERMO, A.; SCOTT, A. Effects of Bond Deterioration due to Corrosion in Reinforced Concrete. **PCCE. Building an Earthquake-Resilient Society**, Auckland, April 2011. 14-16.

MAADDAWY, T. E.; SOUDKI, K.; TOPPER, T. Long-Term Performance of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, v. 102, n. 5, p. 649-656, September-October 2005.

MILANESI, M. A.; ALVES, R. R.; GALVANI, E. Comparativo entre instrumentos pluviométricos experimentais e automáticos. **XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 2013.

OTIENO, M. B.; ALEXANDER, M. G.; BEUSHAUSEN, H. D. Corrosion in cracked and uncracked concrete - influence of crack width, concrete quality and crack reopening. **Magazine of Concrete Research**, june 2010. 393-404.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do Concreto e Projetos de Edifícios.**, São Carlos, 2004.

PITUBA, J. J. C. **Estudo e aplicação de modelos constitutivos para o concreto fundamentados na mecânica do dano contínuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.: [s.n.], 1998.

POLETTI, F. A. B. **Análise da Fluência em Vigas de Concreto Armado Simplesmente Apoiadas Usando o Método dos Elementos Finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba: [s.n.], 2015.

RIBEIRO, D. V. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.: [s.n.], 2010.

RUPOLO, W.; SALGADO, J. R. Desenvolvimento de um protótipo de eletrodo de referência de Cu /CuSO<sub>4</sub> para medida de potencial de corrosão em concreto armado . **Congresso de Engenharia e Ciências Aplicadas nas Três Fronteiras. Anais.**, Foz do Iguaçu, 2019.

SONG, H.-W.; SARASWATHY, V. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag - an overview. **Journal of Hazardous Materials**, v. 138, n. 2, p. 226-233, 2006.

TAHERSHAMSI, M. **Structural Effects of Reinforcement Corrosion in Concrete Structures**. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy - Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Gothenburg: [s.n.], 2016.

VAL, D. V. . M. R. E. Reliability of Deteriorating RC Slab Bridges. **Journal of Structural Engineering**, p. 1638-1644, December 1997.

ZHAO, Y.; JIN, W. **Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking**. [S.l.]: China Science Publishing & Media Ltd., 2016.