

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA  
CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO E  
REABILITAÇÃO COM UHPFRC E CONCRETO TÊXTIL**

**Lucas Alexandre Reginato**

Porto Alegre  
2020

LUCAS ALEXANDRE REGINATO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA  
CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO E  
REABILITAÇÃO COM UHPFRC E CONCRETO TÊXTIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre  
2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Reginato, Lucas Alexandre  
Avaliação experimental dos efeitos da corrosão em  
concreto armado: diagnóstico e reabilitação com UHPFRC  
e Concreto Têxtil / Lucas Alexandre Reginato. -- 2020.  
190 f.  
Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2020.

1. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado. 2.  
Reabilitação Estrutural. 3. Recuperação Estrutural. 4.  
UHPFRC. 5. Concreto Têxtil. I. Silva Filho, Luiz  
Carlos Pinto da, orient. II. Título.

LUCAS ALEXANDRE REGINATO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA  
CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO E  
REABILITAÇÃO COM UHPFRC E CONCRETO TÊXTIL**

Este tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área da Estrutura, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2020.

**Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**  
PhD. pela University of Leeds / UK  
orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo, Brasil

**Prof. Carlos Pérez Bergmann (UFRGS)**  
Dr. pela RWTH-AACHEN, Alemanha

**Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)**  
PhD. pela University of Sheffield, SHEFFIELD, Inglaterra

Dedico este trabalho aos meu pai Sérgio, minha mãe Elita  
e a minha irmã Alana, a quem agradeço as bases que  
deram para me tornar a pessoa que sou hoje

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de uma forma ou de outra colaboraram para o desenvolvimento desta tese. São poucas linhas para fazer este agradecimento e espero não ser injusto e não esquecer ninguém. Porém, não posso deixar de agradecer às pessoas que fizeram parte dessa caminhada.

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos, orientador deste trabalho, pela oportunidade oferecida, por ter me acolhido neste grupo de pesquisa (LEME), agradeço as oportunidades de crescimento dentro do próprio grupo, além do crescimento como pessoa e principalmente pelo incentivo a me tornar um pesquisador, despertando a paixão pela pesquisa. Agradeço por ter aceitado orientar este trabalho e pelos conhecimentos repassados mesmo nas mais atribuladas horas.

Agradeço ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, as pessoas que constituem este grupo e estiveram presentes nessa etapa. Aos meus amigos e colegas de pós-graduação em especial as pessoas que me ajudaram, me apoiaram e contribuíram para a elaboração dos ensaios e redação da dissertação, Kassio, Leandro, Luciane, Luciani, Alexandre, Ângela.

Juntamente, agradeço a todos os bolsistas de iniciação científica que colaboraram durante todo o período. Aos técnicos do Laboratório, Sr. Edgar e Sr. Fontes pela ajuda na execução dos ensaios e todas as logísticas e estratégia experimental, devo eterna gratidão ao todo o apoio de vocês.

Agradeço aos demais professores do LEME, prof. João Luiz Campagnolo, Prof. Dario Klein, a Profa. Ângela Gaio Graeff e a Profa. Luciani S. Lorenzi.

Deixo meu agradecimento em especial ao prof. João Luiz Campagnolo por ser um grande incentivador, apoiador e amigo (além de “colocar uma pressão” para a finalização dos experimentos, que foi fundamental para o andamento do trabalho). Agradeço todo o apoio e recursos disponibilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, além de todo o conhecimento repassado ao longo dos últimos anos.

A CAPES pelo auxílio, por um período determinado, que me possibilitou dedicação à esta pesquisa. Além disso agradeço à FAPERGS pelo auxílio financeiro, através do projeto FAPERGS/CNPq – PRONEX.

Agradeço a toda a minha família, em especial a minha mãe, Elita, principalmente por me dar o maior apoio quando escolhi seguir nesta área, sempre podendo contar contigo. Repito as mesmas palavras a minha irmã Alana, juntamente agradeço ao meu pai, Sergio (in memoriam), que apesar de não estar aqui, sempre esteve do meu lado, servindo como uma fonte de inspiração e de muita admiração.

Agradeço a uma pessoa muito especial: Bruna, incondicionalmente em todas as situações, sendo elas as melhores e as piores, obrigado pelo seu apoio, sua compreensão, sua ajuda, mas principalmente por acreditar em mim, nunca duvidando que eu fosse capaz e também por estar presente comigo, estar ao meu lado nos momentos que mais precisei. Agradeço-lhe em especial, por tornar essa caminhada muito mais agradável e prazerosa.

## RESUMO

REGINATO, L. A. **Avaliação experimental dos efeitos da corrosão em concreto armado: diagnóstico e reabilitação com UHPFRC e Concreto Têxtil.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A construção civil, com o surgimento do concreto armado, sofreu uma mudança de paradigma. Inicialmente, acreditava-se que as estruturas de concreto armado teriam durabilidade ilimitada, não requerendo manutenção. No entanto, foi verificado que erros de projeto, de implementação, de uso e de falta de manutenção podem levar ao desenvolvimento de processos de degradação severos no concreto. Dentre os processos que aceleram a perda do desempenho das estruturas de concreto armado, considerando a ocorrência frequente e a severidade, a corrosão das armaduras pode ser vista como um dos mais importantes. O comprometimento do desempenho estrutural pela corrosão é um tema que tem recebido atenção não só do meio acadêmico, nas últimas décadas, mas também por parte do mercado da construção civil. Um fator preocupante é que boa parte das edificações dos principais centros urbanos brasileiros estão completando entre 40 e 50 anos de vida, momento em que os reparos e manutenções ficam mais rotineiros. Portanto, os problemas relativos à corrosão das armaduras tendem a se acentuar nos próximos anos. Assim, esta pesquisa tem a finalidade, pela realização de ensaios experimentais, de propor duas novas técnicas para a recuperação e a reabilitação de estruturas de concreto armado corroídas. Foram propostos dois procedimentos com potencial inovador: recuperações com UHPFRC e com Concreto Têxtil. Além da recuperação da corrosão, foram aplicadas diferentes técnicas para diagnóstico e foi avaliado o comportamento estrutural à flexão. Para isso, foram analisadas vigas de concreto armado em escala real a fim de obter um comportamento representativo. As vigas possuem 15 cm de base, 30 cm de altura e 300 cm de comprimento. Foi estimulada a corrosão pelo método da Corrosão Acelerada por Imersão Modificada - CAIM, em três níveis de perda de massa 5%, 10% e 15%. Os resultados da pesquisa mostram, em suma, que o diagnóstico da corrosão pelos métodos da resistividade e da taxa de corrosão mostra-se mais eficiente. No comportamento estrutural, se observa uma redução de aproximadamente 10%, 28% e 49% na carga de ruptura das vigas corroídas, respectivamente aos graus de 5%, 10% e 15% de corrosão, afetando significativamente o desempenho estrutural. Referente aos procedimentos de recuperação, foi dimensionada a camada de recuperação, a fim de reabilitar o desempenho estrutural das vigas corroídas ao nível das vigas testemunhos, sem corrosão. Os resultados mostram que para ambas as técnicas, UHPFRC ou Concreto Têxtil, foi possível reabilitar o desempenho estrutural das vigas corroídas, independentemente do nível de corrosão. Porém, houve diferenças entre os métodos de recuperação, indicando melhor desempenho com aplicação do Concreto Têxtil. Por fim, foi observado que, independentemente do grau de corrosão a que as vigas estavam submetidas, estas tiveram seu desempenho estrutural reabilitado ao patamar das vigas sem processo corrosivo, indicando que ambas as técnicas podem ser aplicadas para a reabilitação estrutural de vigas corroídas.

**Palavras-chaves:** Corrosão; Corrosão em Estruturas de Concreto Armado; Reabilitação Estrutural; Recuperação Estrutural; UHPFRC; Concreto Têxtil.

## ABSTRACT

REGINATO, L. A. **Experimental Evaluation of Corrosion's effects on Reinforced Concrete: diagnosis and rehabilitation with UHPFRC and Textile Reinforced Concrete** 2020. Thesis (Doctorate in Engineering) - Civil Engineering Graduate Program, UFRGS, Porto Alegre.

Civil construction suffered a change in its paradigms with the reinforced concrete emergence. Initially, it was believed that reinforced concrete structures would have unlimited durability without requiring maintenance. Nonetheless, it was found that errors in design, implementation, use, and lack of maintenance can lead to severe degradation processes on concrete. In the processes that accelerate the reinforced concrete structures' performance loss, steel corrosion may be one of the most important ones considering the recurring frequency and severity. The compromising of structural performance due to corrosion has received attention in the past decades in the academic and civil construction markets. A concerning factor is that a good amount of edification from the principal Brazilian urban centers are reaching between 40 and 50 years of life, a time in which repair and maintenance become routine. Therefore, problems related to steel corrosion tend to aggravate in the following years. Thus, this research has the finality of proposing two new techniques for the recovery and rehabilitation of the corroded reinforced concrete structures by realizing experimental tests. Two proceedings were proposed with an innovative potential: recuperation with UHPFRC and with Textile Reinforced Concrete. Different diagnostic techniques were applied in addition to the corrosion recuperation, and structural flexural behavior was evaluated. For that, reinforced concrete beams have been analyzed on an accurate scale to obtain an expected behavior: the beams have a base of 14 cm, 30 cm of height, and 300 cm of length. The corrosion was stimulated by the method Modified Immersion Accelerated Corrosion (CAIM test) in three mass loss levels: 5%, 10%, and 15%. The research results show that the corrosion diagnosis by the resistivity methods and the corrosion rate is more efficient. In the structural behavior, it is possible to observe a reduction of approximately 10%, 28%, and 49% in the breaking load of corroding beams, respectively, to the degrees of 5%, 10%, and 15% of corrosion, what significantly affects the structural performance. Regarding the recovery proceeding, the recovery layer was dimensioned to rehabilitate the corroding beams' structural performance to the control beams' level, without corrosion. The results show that in both techniques, UHPFRC or Textile Reinforced Concrete, it was possible to rehabilitate the corrode beam's structural performance, regardless of corrosion level. However, there were differences between the recovery methods, indicating a better performance with Textile Reinforced Concrete's application. Finally, it was observed that regardless of the degree of corrosion to which the beams were subjected, they had their structural performance rehabilitated to the level of the beams without a corrosive process, indicating that both techniques may be applied to the rehabilitating of corroding beams.

**Keywords:** Corrosion; Corrosion in Reinforced Concrete Structures; Structural Rehabilitation; UHPFRC; Textile Reinforced Concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema ilustrativo das etapas da pesquisa.....	29
Figura 2: Resistência à tração nominal de barras de aço corroídas .....	34
Figura 3: Resistência à tração de serviço de barras de aço corroídas.....	35
Figura 4: Efeito da duração da exposição à névoa salina na perda de massa (a) e, resistência à tração de barras de aço corroídas por névoa salina (b).....	35
Figura 5: Efeito da duração de exposição à névoa salina sob (a) o alongamento até a ruptura e sob (b) a tenacidade .....	37
Figura 6: Curvas de alongamento para barras de aço de 6 mm de diâmetro com diferentes graus de corrosão.....	37
Figura 7: (a) Força de aderência para baixos níveis de corrosão e (b) força de aderência última para diferentes graus de corrosão .....	39
Figura 8: Relação carga x deslocamento obtida da flexão de quatro pontos para diferentes níveis de corrosão.....	41
Figura 9: Curva de tensão de compressão nominal para UHPFRC.....	46
Figura 10: Resposta mecânica de tração uniaxial idealizada de UHPFRC .....	48
Figura 11: Configurações de reabilitação e recuperação: (a) para função de proteção, (b) para proteção e em alguns casos recuperação da resistência e (c) para aumento da resistência e função de proteção.....	50
Figura 12: Tensão-deformação teórica do Concreto Têxtil sob carregamento uniaxial.....	54
Figura 13: Curva típica obtida do ensaio de flexão a quatro pontos para as vigas de concreto armado reforçadas com Concreto Têxtil .....	55
Figura 14: Detalhamento da armadura das vigas de concreto armado .....	63
Figura 15: Malha têxtil ARMO-mesh L500 .....	70
Figura 16: Detalhamento do programa experimental .....	72
Figura 17: Layout adotado para o aceleração da corrosão .....	75
Figura 18: Execução da aceleração da corrosão nas vigas de concreto armado.....	76
Figura 19: Posicionamento do eletrodo de corrosão .....	78
Figura 20: Fixação do eletrodo de corrosão e fio condutor .....	78
Figura 21: Sequência da concretagem das vigas, posicionamento (a), lançamento e adensamento do concreto (b) e, concretagem das vigas e moldagem dos corpos de prova finalizados (c) ...	79
Figura 22: Evolução da temperatura de cura à vapor .....	80

Figura 23: Localização das armaduras por pacometria e marcação do grid de leitura para avaliação por END.....	82
Figura 24: Determinação do potencial de corrosão com o equipamento Gecor 8.....	83
Figura 25: Determinação da taxa de corrosão com o equipamento Gecor 8.....	85
Figura 26: Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal de uma viga submetida a flexão .....	86
Figura 27: Fluxograma para a determinação da capacidade resistente à flexão.....	87
Figura 28: Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal de uma viga submetida a flexão com recuperação com UHPFRC.....	90
Figura 29: Área corroída a ser recuperada com reforço de UHPFRC.....	93
Figura 30: Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal de uma viga submetida a flexão com recuperação com Concreto Têxtil .....	94
Figura 31: representação da região removida do concreto .....	99
Figura 32: Realização da demarcação e corte com disco diamantado .....	100
Figura 33 : Remoção do concreto manualmente (a) e mecanicamente (b) .....	100
Figura 34: Remoção dos produtos de corrosão .....	101
Figura 35: Armadura com produtos de corrosão (a) e a armadura com os produtos removidos (b) .....	101
Figura 36: Tratamento da armadura corroída com pintura a base de epóxi rico em zinco (a) e, após o tempo de cura da pintura (b) .....	102
Figura 37: Sequência da recuperação com UHPFRC.....	103
Figura 38: Viga recuperada com o UHPFRC.....	103
Figura 39: Posicionamento da malha de Concreto Têxtil, distâncias em centímetros .....	104
Figura 40: Sequência da recuperação com Concreto Têxtil .....	105
Figura 41: Sequência de posicionamento das camadas da malha têxtil .....	106
Figura 42: viga já recuperada com o Concreto Têxtil .....	107
Figura 43: Vista frontal do sistema de ensaios .....	108
Figura 44: Vista lateral do sistema de ensaios.....	108
Figura 45: Esquema de carregamento da viga, distâncias em centímetros .....	109
Figura 46: Localização dos sensores de deslocamentos e deformações, distâncias em centímetros .....	109
Figura 47: Localização dos sensores de deslocamentos na seção central .....	110
Figura 48: sistema de fixação baseado no dispositivo “yoke”, distâncias em centímetros ....	111

Figura 49: Fixação do sistema de suporte dos LVDTs (a) e, fixação do LVDT no suporte (b) .....	112
Figura 50: Instalação do extensômetro no concreto: marcação da posição (a), remoção da nata de cimento e delimitação (b), aplicação do primer (c) e pós aplicação da resina e marcação da posição do extensômetro(d).....	113
Figura 51: Instalação do extensômetro no concreto: posicionamento com fita adesiva e colagem (a), solda do extensômetro no cabo de aquisição de dados (b) e, proteção do extensômetro (b) .....	113
Figura 52: Abertura realizada na viga com extensômetro colado na armadura .....	114
Figura 53: Ligação do extensômetro das armaduras com o cabo de aquisição de dados.....	114
Figura 54: Instalação do extensômetro no UHPFRC: posicionamento (a), solda no cabo de aquisição de dados (b) e, proteção do extensômetro (c).....	115
Figura 55: Instalação do extensômetro na malha têxtil: separação do filamento central (a) e, extensômetro colado sobre o filamento central .....	116
Figura 56: Instalação do extensômetro na malha têxtil: ponte de ligação entre o extensômetro e o cabo de aquisição de dados (a) e, posicionamento da ponte de ligação após execução da recuperação (b) .....	116
Figura 57: Região de retirada das armaduras da viga, distâncias em centímetros .....	117
Figura 58: Resistência à compressão média .....	121
Figura 59: Período de propagação da corrosão .....	128
Figura 60: Correlação linear entre o grau de corrosão teórico e o grau de corrosão real .....	132
Figura 61: Grau de corrosão real obtido para cada grupo de corrosão .....	133
Figura 62: Grau de corrosão real obtido para procedimento de recuperação .....	134
Figura 63: Mapeamento do potencial de corrosão, distâncias em centímetros .....	136
Figura 64: Mapeamento da resistividade, distâncias em centímetros .....	138
Figura 65: Mapeamento da taxa de corrosão, distâncias em centímetros .....	140
Figura 66: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas sem corrosão (a), vigas com 5% de corrosão (b), vigas com 10% de corrosão (c), e vigas com 15% de corrosão (d).....	143
Figura 67: Quadro geral de fissuração das viga sem corrosão .....	145
Figura 68: Modo de ruptura das vigas com 5% de corrosão (a) e com 10% de corrosão (b).145	145
Figura 69: Modo de ruptura da vigas com 15% de corrosão.....	145
Figura 70: Detalhe da ruptura da armadura longitudinal corroída (a) e seção transversal de ruptura (b).....	146
Figura 71: Curva deformada média para diferentes graus de corrosão .....	147

Figura 72: Fator de ductilidade dos grupos de vigas .....	148
Figura 73: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com UHPFRC (a), vigas com 10% de corrosão (b), vigas com 15% de corrosão .....	150
Figura 74: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com UHPFRC (a), vigas com 10% de corrosão (b), vigas com 15% de corrosão em comparação às vigas testemunhos .....	151
Figura 75: Quadro geral de fissuração instantes antes da ruptura da viga sem corrosão (a), com corrosão de 10% e recuperada com UHPFRC (b), e com corrosão de 15% e recuperada com UHPFRC (c) .....	152
Figura 76: Sequência de ruptura das recuperadas com UHPFRC, instantes antes da ruptura (a), após a ruptura (b), detalhe da seção de ruptura (c) e, ruptura da armadura longitudinal (d)..	153
Figura 77: Curva deformada média para as vigas com corrosão de 10 % e recuperadas com UHPFRC.....	154
Figura 78: Linha elástica média para as vigas com corrosão de 15 % e recuperadas com UHPFRC.....	155
Figura 79: Deformações específicas média das armaduras na carga de 72,2 kN.....	156
Figura 80: Diagrama carga x deformação específica das vigas testemunhos (a), vigas com 10% de corrosão e recuperadas com UHPFRC (b) e, vigas com 15% de corrosão e recuperadas com UHPFRC (c) .....	157
Figura 81: Fator de ductilidade para grupos de vigas recuperadas.....	158
Figura 82: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com Concreto Têxtil, vigas com 10% de corrosão(a), vigas com 15% de corrosão (b).....	160
Figura 83: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com Concreto Têxtil (a), vigas com 10% de corrosão (b), vigas com 15% de corrosão em comparação às vigas testemunhos .....	161
Figura 84: Quadro geral de fissuração instantes antes da ruptura da viga sem corrosão (a), com corrosão de 10% e recuperada com Concreto Têxtil (b), e com corrosão de 15% e recuperada com Concreto Têxtil (c).....	162
Figura 85: Sequência de ruptura das recuperadas com Concreto Têxtil, instantes antes da ruptura (a), após a ruptura (b), detalhe da seção de ruptura (c) e, ruptura da armadura longitudinal (d) .....	163
Figura 86: Curva deformada média para as vigas com corrosão de 10 % e recuperadas com Concreto Têxtil .....	164
Figura 87: Curva deformada média para as vigas com corrosão de 15 % e recuperadas com Concreto Têxtil .....	164
Figura 88: Deformações específicas médias das armaduras na carga de 72,2 kN .....	165

Figura 89: Diagrama carga x deformação específico das vigas testemunhos (a), vigas com 10% de corrosão e recuperadas com Concreto Têxtil (b) e vigas com 15% de corrosão e recuperadas com Concreto Têxtil (c).....	166
Figura 90: Fator de ductilidade para grupos de vigas recuperadas.....	167
Figura 91: Média da força máxima para cada grupo de vigas.....	169
Figura 92: Síntese da análise de variância do grau de corrosão .....	170
Figura 93: Médias da carga máxima em relação aos procedimentos de recuperação .....	172
Figura 94: Síntese da análise de variância do grau de corrosão das vigas recuperadas .....	173

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistência à compressão para as diferentes concretagens e a idade de ruptura....	120
Tabela 2: Análise de variância para os valores de resistência à compressão .....	121
Tabela 3: Módulo de elasticidade à compressão para as diferentes concretagens e a idades de ruptura.....	122
Tabela 4: Análise de variância para o módulo de elasticidade.....	122
Tabela 5: Resistência à compressão do UHPFRC para as diferentes vigas recuperadas .....	124
Tabela 6: Análise de variância para a resistência à compressão do UHPFRC.....	124
Tabela 7: Módulo de elasticidade do UHPFRC para as diferentes vigas recuperadas.....	125
Tabela 8: Análise de variância para o módulo de elasticidade do UHPFRC .....	125
Tabela 9: Resistência à compressão da argamassa aos 28 dias para as diferentes vigas recuperadas.....	126
Tabela 10: Análise de variância para a resistência à compressão da argamassa.....	126
Tabela 11: Resistência à tração na flexão da argamassa aos 28 dias para as diferentes vigas recuperadas.....	127
Tabela 12: Análise de variância para a resistência à tração na flexão da argamassa .....	127
Tabela 13: Grau de corrosão teórico das vigas corroídas .....	130
Tabela 14: Grau de corrosão real obtido experimentalmente em comparação aos valores teóricos .....	131
Tabela 15: Comparação entre a corrosão pretendida e a real pelo coeficiente de correlação de Pearson .....	131
Tabela 16: Análise de variância para o grau de corrosão real .....	132
Tabela 17: Média e desvio padrão do potencial de corrosão para as vigas corroídas e testemunhos .....	135
Tabela 18: Média e desvio padrão da resistividade para as vigas corroídas e testemunhos...	137
Tabela 19: Média e desvio padrão da taxa de corrosão para as vigas corroídas e testemunhos .....	139
Tabela 20: Comparação entre cargas de ruptura à flexão.....	141

Tabela 21: Análise de variância para a capacidade portante em função da corrosão.....	169
Tabela 22: Análise de variância para a capacidade portante em função do procedimento de recuperação .....	170
Tabela 23: Comparação das médias da capacidade portante em função do procedimento de recuperação para o limite de decisão de 8,23 kN .....	171
Tabela 24: Análise de variância para a capacidade portante em grau de corrosão recuperado .....	173

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Caracterização química do cimento.....	63
Quadro 2: Caracterização física do cimento.....	63
Quadro 3: Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos .....	64
Quadro 4: Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos .....	64
Quadro 5: Descrição do traço utilizados na execução das vigas de concreto armado.....	65
Quadro 6: Caracterização química do cimento usado no UHPFRC.....	66
Quadro 7: Caracterização física do cimento usado no UHPFRC .....	66
Quadro 8: Características físicas e químicas da sílica ativa .....	66
Quadro 9: Características físicas e granulométricas das areias naturais .....	67
Quadro 10: Descrição do traço do UHPFRC utilizados na recuperação das vigas de concreto armado corroídas .....	68
Quadro 11: Dados da malha têxtil ARMO-mesh L500.....	71
Quadro 12: Cominações de avaliação e nomenclatura das vigas .....	73
Quadro 13 Correlação entre os valores de ddp e a probabilidade de corrosão.....	82
Quadro 14: Correlação entre os valores de resistividade e a probabilidade de corrosão .....	83
Quadro 15: Faixas de valores de densidade de corrente e velocidade de corrosão relacionados à significância em termos de vida útil da armadura .....	85
Quadro 16: Dados adotados para verificação do momento último de ruptura da vigas sem corrosão .....	96
Quadro 17: Dados adotados para verificação do momento último de ruptura da vigas com corrosão.....	96
Quadro 18: Momento último de ruptura da vigas com corrosão .....	97
Quadro 19: Dados adotados para verificação do momento último de ruptura da vigas com corrosão recuperadas .....	98
Quadro 20: Momento último de ruptura da vigas com corrosão recuperadas com UHPFRC e Concreto Têxtil .....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CAIM	Corrosão por Imersão Modificada
CEB	Comite Euro-International du Beton
CONTEXT	Grupo de Pesquisa em Concretos Têxteis
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CT	Concreto Têxtil
ECC	<i>Engineered Cementitious Composites</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
FRCM	<i>Fabric Reinforced Cementitious Matrix</i>
HPC	<i>High Performance Concrete</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
LEME	Laboratório de Ensaio de Modelos Estruturais
LVDT	<i>Linear Variation Displacement Transducer</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
NEXCES	Núcleo de Excelência em Concretos Especiais
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems And Structures</i>
RPC	<i>Reactive Powder Concrete</i>
SG	<i>Strain Gauge</i>
TRC	<i>Textile Reinforced Concrete</i>
TRM	<i>Textile Reinforced Mortar</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
UHPRC	Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta m$	Massa de aço consumida
$M$	Peso atômico do metal
$I$	Corrente aplicada
$t$	Tempo de aceleração da corrosão
$z$	Carga iônica
$F$	Constante de Faraday
$t_c$	Tempo de corrosão
$M_u$	Momento fletor último
$\sigma_s$	Tensão na armadura longitudinal positiva
$\sigma'_s$	Tensão na armadura longitudinal negativa
$\sigma_c$	Tensão à compressão do concreto
$A_s$	Área da seção transversal da armadura longitudinal positiva
$A'_s$	Área da seção transversal da armadura longitudinal negativa
$d$	Distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura positiva
$d'$	Distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura Negativa
$b_w$	Largura da base da viga
$x$	Posição da linha neutra
$f_c$	Resistência à compressão do concreto
$\varepsilon_c$	Deformação específica no concreto
$\varepsilon_{c2}$	Deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$\varepsilon_s$	Deformação específica no aço
$f_y$	Tensão de escoamento do aço
$\sigma_s^{corr}$	Tensão de tração no aço considerando os efeitos da corrosão
$Q_{corr}$	Grau de corrosão expresso em termos da redução da seção da armadura
$f_y$	Tensão de escoamento do aço, sem efeitos da corrosão
$d_{corr}$	Diâmetro da armadura corroída
$d$	Diâmetro da armadura não corroída
$A_s^{corr}$	Área de aço da armadura corroída
$A_s$	Área de aço da armadura não corroída
$M_u^{corr}$	Momento fletor último da considerando a corrosão das armaduras
$\sigma_{UH}$	Tensão de tração no UHPFRC
$E_{UH}$	Módulo de elasticidade do UHPFRC
$\varepsilon_{UH}$	Deformação específica do UHPFRC

$f_{tUH}$	Tensão de tração máxima do UHPFRC, para a deformação específica
$E_{UH}$	Módulo de elasticidade do UHPFRC
$f_{cUH}$	Resistência à compressão
$f_{tUH}$	Tensão de tração máxima do UHPFRC
$f_{cUH}$	Resistência à compressão
$A_{UH}$	Área do reforço do UHPFRC
$b_w$	Base da viga
$h_{UH}$	Altura do reforço em UHPFRC
$M_{uUH}^{corr}$	Fletor último da considerando a corrosão das armaduras e reforço em UHPFRC
$d_{UH}$	Distância entre a fibra mais comprimida e o centroide do têxtil
$\sigma_s$	Tensão no têxtil
$E_t$	Módulo de elasticidade têxtil
$\varepsilon_t$	Deformação específica no têxtil
$A_t$	Área do têxtil
$g$	Gramatura da malha têxtil
$\rho$	Densidade da fibra da malha têxtil
$b$	Largura da tira de reforço
$Mu_t^{corr}$	Momento fletor último da considerando a corrosão das armaduras e reforço em Concreto Têxtil
$d_t$	Distância entre a fibra mais comprimida e o centroide do têxtil
$n$	Número de camadas da malha têxtil
$GC$	Grau de corrosão, expresso em perda de massa
$m_{ref}$	Média da massa linear das armaduras não corroídas
$m_{cor}$	Massa linear individual a armadura corroída
LD	Limite de decisão
$MQerro$	Média quadrática do erro amostral
$nc$	Soma do número de amostras de cada variável, dividido pelo número de variáveis

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA .....	23
1.2	DELINEAMENTO DA PROPOSTA DE PESQUISA.....	27
1.3	OBJETIVOS .....	28
1.4	ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	28
1.5	LIMITAÇÕES .....	29
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	30
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>31</b>
2.1	CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: EFEITOS DA CORROSÃO NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL .....	31
2.1.1	Grau de corrosão de estruturas de concreto armado: considerações gerais.....	31
2.1.2	Mecanismo de corrosão em estruturas de concreto armado.....	32
2.1.3	Efeitos da corrosão nas propriedades mecânicas da armadura.....	33
2.1.3.1	Efeitos na resistência à tração .....	33
2.1.3.2	Efeitos na ductilidade.....	36
2.1.4	Influência da perda de aderência entre as armaduras e o concreto.....	38
2.1.5	Efeitos da corrosão no comportamento à flexão do concreto armado.....	40
2.2	CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AOS PROCEDIMENTOS DE RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS .....	42
2.3	CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS: UHPFRC .....	43
2.3.1	Propriedades mecânicas .....	45
2.3.1.1	Resistência à compressão.....	45
2.3.1.2	Módulo de elasticidade .....	47
2.3.1.3	Resistência à tração.....	47
2.3.2	Durabilidade.....	48
2.3.3	Aplicação do UHPFRC em recuperação de estruturas de concreto armado .....	49
2.4	CONCRETO TÊXTIL .....	51
2.4.1	Nomenclatura.....	52

2.4.2	Concreto Têxtil como material de reforço .....	53
2.4.3	Aplicação do Concreto Têxtil para reforço e recuperação .....	56
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>59</b>
3.1	VARIÁVEIS DE PESQUISA.....	59
3.1.1	Grau de corrosão .....	60
3.1.2	Procedimento de recuperação .....	60
3.2	DETALHAMENTO DAS VIGAS E DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE RECUPERAÇÃO.....	61
3.2.1	Projeto Estrutural das Vigas de Concreto Armado .....	61
3.2.1.1	Dimensões e detalhamento das vigas .....	62
3.2.1.2	Materiais utilizados .....	63
3.2.1.3	Propriedades do concreto .....	65
3.2.2	UHPFRC .....	65
3.2.3	Concreto Têxtil .....	68
3.2.3.1	Matriz Cimentícia .....	69
3.2.3.2	Malha Têxtil.....	70
3.3	ESTRUTURA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	71
3.4	CORROSÃO ACELERADA.....	73
3.5	CONCRETAGEM .....	78
3.6	MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO .....	81
3.6.1	Potencial de Corrosão .....	81
3.6.2	Resistividade .....	83
3.6.3	Taxa de corrosão .....	84
3.7	ESTIMATIVA DA CARGA DE RUPTURA E DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS .....	85
3.7.1	Descrição dos modelos resistentes à flexão das vigas de concreto armado .....	86
3.7.1.1	Vigas de concreto armado íntegras .....	86
3.7.1.2	Vigas de concreto armado corroídas .....	89
3.7.1.3	Vigas de concreto armado corroídas e recuperadas com UHPFRC .....	90
3.7.1.4	Vigas de concreto armado recuperadas com concreto têxtil .....	94
3.7.2	Estimativa do momento de ruptura das vigas e dimensionamento dos reforços .....	96
3.8	PROCEDIMENTOS DE RECUPERAÇÃO.....	99
3.8.1	Remoção do concreto degradado e tratamento da corrosão na armadura .....	99

3.8.2	Recuperação com UHPFRC.....	102
3.8.3	Recuperação com Concreto Têxtil.....	103
3.9	METODOLOGIA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO.....	107
3.9.1	Metodologia de ensaio.....	107
3.9.2	Instrumentação.....	109
3.9.2.1	Sistema de aquisição de dados.....	110
3.9.2.2	Força.....	110
3.9.2.3	Deslocamentos verticais.....	110
3.9.2.4	Deformação específica do concreto.....	112
3.9.2.5	Deformação específica da armadura.....	114
3.9.2.6	Deformação específica do UHPFRC.....	115
3.9.2.7	Deformação específica do Concreto Têxtil.....	115
3.10	AVALIAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO.....	117
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>119</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	119
4.1.1	Concreto.....	119
4.1.1.1	Concreto: resistência à compressão.....	119
4.1.1.2	Concreto: módulo de elasticidade.....	122
4.1.2	Armaduras.....	123
4.1.3	UHPFRC.....	123
4.1.3.1	UHPFRC: resistência à compressão.....	123
4.1.3.2	UHPFRC: módulo de elasticidade.....	124
4.1.4	Concreto Têxtil.....	125
4.1.4.1	Concreto Têxtil: resistência à compressão.....	126
4.1.4.2	Concreto Têxtil: resistência à tração por flexão.....	127
4.2	CORROSÃO ACELERADA.....	127
4.2.1	Corrosão acelerada: corrosão teórica.....	128
4.2.2	Corrosão acelerada: corrosão real.....	130
4.3	DIAGNÓSTICO DA CORROSÃO POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS.....	134
4.3.1	Potencial de corrosão.....	134
4.3.2	Resistividade.....	136
4.3.3	Taxa de corrosão.....	138

4.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS À FLEXÃO .....	140
4.5	EFEITOS DA CORROSÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO .....	141
4.5.1	Avaliação comportamento à flexão: carga x deslocamento .....	142
4.5.2	Padrão de ruptura .....	144
4.5.3	Curva deformada da viga .....	146
4.5.4	Ductilidade na flexão .....	147
4.6	RECUPERAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS COM UHPFRC .....	149
4.6.1	Recuperação com UHPFRC: avaliação comportamento á flexão .....	149
4.6.2	Recuperação com UHPFRC: padrão de ruptura .....	152
4.6.3	Recuperação com UHPFRC: curva deformada da viga .....	154
4.6.4	Recuperação com UHPFRC: análise das deformações específicas .....	155
4.6.5	Recuperação com UHPFRC: ductilidade na flexão .....	158
4.7	RECUPERAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS COM CONCRETO TÊXIL .....	159
4.7.1	Recuperação com Concreto Têxtil: avaliação do comportamento à flexão .....	159
4.7.2	Recuperação com Concreto Têxtil: padrão de ruptura .....	162
4.7.3	Recuperação com Concreto Têxtil: curva deformada da viga.....	163
4.7.4	Recuperação com Concreto Têxtil: análise das deformações específicas .....	165
4.7.5	Recuperação com Concreto Têxtil: ductilidade na flexão.....	167
4.8	COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO PROPOSTOS .....	168
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>174</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	174
5.2	CONCLUSÕES .....	177
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	178
	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>179</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo expor o escopo desta tese, apresentando, primeiramente, o contexto no qual se insere esta pesquisa, bem como ilustrar os problemas identificados sobre o tema, que possibilitaram a formulação da questão de pesquisa. Além disso, são apresentados os objetivos, a limitação e estruturação do presente trabalho.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

A Construção Civil, a partir das primeiras décadas do século XX, sofreu uma mudança de paradigma: as principais estruturas, até o momento, eram executadas com os tradicionais métodos construtivos baseados em alvenarias autoportantes e estruturas metálicas. A mudança de paradigma deu-se com o surgimento do concreto armado. O material tinha potencial inovador pois unia a versatilidade e disponibilidade do concreto com a elevada resistência do aço. Desta forma, houve uma ascensão da tecnologia do concreto armado a partir das primeiras décadas do século passado.

Uma grande parte desse crescimento ocorreu pois, inicialmente, se acreditava que as estruturas de concreto armado, em geral, teriam durabilidade ilimitada não requerendo manutenção. Portanto, no advento do concreto armado, este era proclamado como um material de durabilidade ilimitada. Entretanto, sabe-se hoje que estas características não são encontradas em nenhum material construtivo, sendo que todos sofrem desgaste e perdem desempenho ao longo do tempo. Realmente, no período atual, reconhece-se que sendo adequadamente projetado, executado e dosado, o concreto armado apresenta uma vida útil considerável, desde que devidamente avaliadas, entre outros fatores, as condições de exposição ao meio, medidas protetivas e manutenções.

No entanto, foi verificado que erros de projeto e de implementação de estruturas de concreto armado, que podem, por exemplo, estar relacionados a certas condições de exposição desfavoráveis, podem levar ao desenvolvimento de processos de degradação severos. Por esse motivo, o conhecimento relativo à durabilidade do concreto armado começou a mudar, gradualmente, a partir da década de 1950. Esta busca de entendimento sobre o comportamento do material, ao longo de sua vida útil, deu origem a diversos estudos com o objetivo de compreender os mecanismos causadores da degradação destas estruturas. Isto deu origem,

dentro da Engenharia Civil, a uma área denominada “Patologia das Construções”, que, até hoje, é amplamente difundida e popularizada no meio acadêmico e profissional.

O estudo das patologias das construções consiste em avaliar, em edificações com problemas, os seus sintomas, comumente denominados de manifestações patológicas. As manifestações patológicas envolvem conhecimento, muitas vezes complexo, sobre os mecanismos de degradação que geram estes sintomas. Por sua vez, os mecanismos de degradação podem impactar diretamente na vida útil das edificações, muito especialmente, das estruturas de concreto armado, comprometendo sua funcionalidade ou, até mesmo, levando ao seu colapso estrutural.

Dentre os mecanismos de degradação, que aceleram a perda de desempenho das estruturas de concreto armado, considerando a ocorrência frequente e a severidade, a corrosão das armaduras pode ser considerada a mais importante. A corrosão das armaduras deve ser observada com cautela, pois irá modificar alguns parâmetros fundamentais do projeto estrutural, gerando efeitos deletérios, dentre eles: a redução da seção transversal da armadura; fissuração do concreto devido às tensões de pressão dos produtos de corrosão; deslocamento da camada de revestimento; redução da aderência entre a armadura e o concreto; e diminuição do comportamento dúctil do aço. A redução do comportamento dúctil é um fator preocupante, visto que a redução desse parâmetro gera rupturas súbitas, sem aviso prévio.

Porém o mecanismo fenomenológico da corrosão é naturalmente um processo lento, inviabilizando a avaliação natural do processo, fazendo com que haja necessidade de métodos de aceleração do processo corrosivo para a avaliação experimental. Um dos métodos já difundido e utilizado é através da Corrosão por Imersão Modificada (CAIM). O método possibilita a aceleração do processo corrosivo, permitindo a avaliação experimental dos efeitos da corrosão em estruturas de concreto armado. Alguns parâmetros são adotados para evitar a divergência com o fenômeno natural.

Relativo à análise experimental da corrosão, um fator limitante são as dimensões do elemento estrutural, geralmente devido às limitações experimentais, por exemplo, de movimentação ou equipamentos necessários. Isso faz com que elementos reduzidos sejam empregados para a avaliação experimental da corrosão, porém Ahn e Reddy (2001) relatam que o efeito de escala pode afetar o comportamento estrutural de elementos de concreto armado. Elementos com menor dimensão tendem a apresentar efeitos diferentes dos das situações reais, influenciando

diretamente o comportamento estrutural sob efeitos de corrosão. Um ponto chave, portanto, na avaliação experimental da corrosão é a avaliação de elementos representativos, ou seja, que se aproximem de estruturas reais, evitando que dimensões reduzidas interfiram na avaliação dos efeitos deletérios da corrosão no desempenho estrutural.

O comprometimento do desempenho estrutural pela corrosão, é um tema que tem recebido atenção, não só do meio acadêmico, nas últimas décadas, mas por parte do mercado da Construção Civil. Dentre ocorrências registradas, destaca-se o incidente relacionado ao colapso estrutural, em função da corrosão das armaduras e intervenção inadequada, do edifício Andrea, em Fortaleza – CE em 2019. Em vista disso, justifica-se ser a avaliação dos efeitos deletérios da corrosão em estruturas de concreto armado adotada como um dos focos da presente pesquisa, juntamente com o diagnóstico da corrosão, visto que a sua identificação precoce pode evitar que situações de colapso ocorram.

A corrosão das armaduras é um dos principais desafios que a Engenharia Civil enfrenta atualmente. Conforme El-Reedy (2018), este tipo de manifestação patológica, faz com que bilhões de dólares sejam gastos em todo o mundo. Um exemplo são os gastos bilionários em reparos de tabuleiros de pontes nos Estados Unidos. Portanto, é fundamental conhecer as causas da corrosão, os parâmetros do concreto e as condições ambientais que atuam na estrutura. Para novos projetos, é indispensável a consideração do aprimoramento da vida útil de estruturas de concreto armado.

Um fator preocupante, conforme Cascudo e Ribeiro (2018), é que boa parte das edificações dos principais centros urbanos brasileiros e de sua infraestrutura foram construídos nas décadas de 1970 e 1980, chegando, atualmente, a 40 e 50 anos de vida, respectivamente. Estruturas executadas naquela época estão, portanto, chegando ao momento em que os reparos e manutenções ficam mais rotineiros e, portanto, os problemas relativos à corrosão das armaduras tendem a se acentuar nos próximos anos. Desta maneira, é essencial que a recuperação e reabilitação de estruturas de concreto armado, afetadas por corrosão, sejam realizadas de forma eficaz, não somente sob o ponto de vista de manutenção da vida útil, mas também relativo a recuperação do desempenho estrutural.

Quando analisada a recuperação da corrosão sobre o ponto de vista da vida útil, diversos materiais são utilizados a fim de proteger e assegurar a durabilidade do sistema. Os materiais são selecionados devido às suas propriedades (resistência, aderência, porosidade, retração) e

características (trabalhabilidade, técnica executiva, cura). Entre as possibilidades há argamassas com adições pozolânicas, grouts, argamassas poliméricas, argamassas tixotrópica entre outros. Em síntese, deve ser empregado um material com características e propriedades compatíveis com os requisitos mecânicos, de durabilidade e de execução.

Relativo ao desempenho estrutural, a recuperação da corrosão é basicamente dividida em relação ao grau de corrosão da armadura: reduções menores que 10% e reduções maiores ou iguais a 10%.

Helene (1986), Cascudo (1999) e Ribeiro (2018), entre outros, recomendam que em situações com redução menor que 10%, somente se realize o processo de tratamento da corrosão, sem necessidade de reforço ou recuperação. Esse procedimento é indicado tendo em vista que reduções menores que 10% não afetam expressivamente o desempenho estrutural.

Entretanto, quando há perda da seção transversal da armadura maior ou igual a 10%, devido à corrosão, é indicado o processo de recuperação estrutural e/ou reforço (CASCUDO, 1997). O procedimento de recuperação mais difundido é a substituição da armadura comprometida pelo processo corrosivo por outra de mesmo diâmetro. Essa técnica de recuperação é uma das mais simples de ser realizada, porém demanda um tempo de recuperação maior devido ao tipo de processo: substituição e ancoragem das barras.

Alternativamente a esse procedimento, tem-se a realização de reforços estruturais em elementos corroídos. O procedimento de reforço consiste, basicamente, em recuperar a corrosão (conforme procedimento com redução menor que 10%) e projetar/executar reforços de acordo com a capacidade estrutural comprometida, devido à corrosão das armaduras. Diversas técnicas de reforços podem ser utilizadas, com por exemplo, recuperação com acréscimo de armadura, reforços com fibras poliméricas, chapas coladas, perfis metálicos.

Levando em consideração que o procedimento de recuperação da corrosão deve garantir a manutenção da vida útil e, para níveis elevados do grau de corrosão, assegurar o desempenho estrutural, essa pesquisa propõem dois procedimentos inovadores para a recuperação de estruturas de concreto armado, afetadas por corrosão, ou seja, a recuperação: com Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçados com Fibras (UHPRFC, em inglês) e com Concreto Têxtil. As duas técnicas de recuperação apontam como promissoras, pois apresentam elevados parâmetros de durabilidade e, ao mesmo tempo possuem características mecânicas elevadas.

## 1.2 DELINEAMENTO DA PROPOSTA DE PESQUISA

Como discutido no item anterior, a preocupação com a corrosão no concreto vem ganhando relevância nas últimas décadas. A deterioração das estruturas de concreto armado por corrosão passou a ser encarada como um problema estrutural grave, que afeta a confiabilidade da estrutura e necessita ser prevenida por medidas de projeto ou por recuperação com técnicas e procedimentos adequados. Porém, são necessários maiores estudos relativos aos efeitos da corrosão em estruturas de concreto, visto que, usualmente, a avaliação experimental dos danos é realizada em elementos com escala reduzida. Isso se deve, principalmente, à mobilização necessária para a avaliação da corrosão em elementos representativos, porém o fator escala pode acabar interferindo no mecanismo da corrosão, podendo intensificar ou, até mesmo, reduzir os efeitos deletérios. Ao mesmo tempo em que a corrosão gera efeitos no comportamento das estruturas de concreto armado, a aplicação de técnicas de diagnóstico podem ser úteis para a detecção da corrosão, tanto para níveis mais brandos quanto para os severos.

À vista disso, a presente pesquisa visa analisar, experimentalmente, o comportamento de elementos representativos (em escala real) de concreto armado quando afetados pela corrosão das armaduras. Por meio de uma avaliação experimental em vigas de concreto armado, buscou-se coletar dados equivalentes aos de estruturas reais. Acredita-se que estes resultados poderão servir de base para futuros modelos de avaliação da condição de segurança e da necessidade de manutenção de estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão. Além disso, procurou-se avaliar técnicas para analisar a corrosão, em diferentes níveis de degradação, definindo a melhor correlação de diagnóstico, auxiliando na detecção da corrosão neste tipo de estrutura. Espera-se que este estudo represente uma colaboração importante dada a significância que o fenômeno de corrosão de armaduras tem na perda de desempenho de vários tipos de estruturas de concreto armado.

Esta pesquisa, além do diagnóstico e avaliação dos efeitos da corrosão, propõe dois procedimentos de reabilitação de estruturas de concreto armado afetadas por corrosão, ou seja, recuperações com: UHPFRC e Concreto Têxtil. Em ambos os casos, o objetivo é o da reabilitação da corrosão sobre o ponto de vista de desempenho estrutural. Portanto, investigou-se se as técnicas propostas podem colaborar na área de recuperação de estruturas de concreto armado afetadas por corrosão.

Em síntese, buscou-se, com o desenvolvimento desta pesquisa, prover respostas para as seguintes perguntas:

- a) Considerando elementos de concreto armado em escala real, é possível acelerar o processo corrosivo?
- b) Quais os efeitos no desempenho estrutural da deterioração do concreto armado, pela corrosão de armaduras em elementos com escala real?
- c) É possível reabilitar, com o emprego de UHPFRC e Concreto Têxtil, o desempenho estrutural de vigas de concreto armado corroídas?

### 1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo idealizado para a presente tese consiste em propor duas novas técnicas para a recuperação e reabilitação estrutural de vigas de concreto armado corroídas, através de uma análise experimental com elementos representativos em escala real.

Desta forma, definiu-se, como objetivos específicos para o trabalho:

- a) avaliar a aplicação da corrosão acelerada pelo método da imersão modificada (CAIM) em elementos com escala real;
- b) diagnosticar corrosão por diferentes métodos não destrutivos;
- c) avaliar os efeitos da corrosão no desempenho estrutural de vigas de concreto armado;
- d) avaliar a aplicação do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) na reabilitação estrutural de vigas de concreto armado corroídas;
- e) avaliar a aplicação do Concreto Têxtil na reabilitação estrutural de vigas de concreto armado corroídas;
- f) comparar as diferentes reabilitações propostas em relação a elementos íntegros, sem processo corrosivo.

### 1.4 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Estabelecido o delineamento, expondo objetivos para a presente tese, foi definida uma estratégia de pesquisa adequada para o desenvolvimento do estudo. Inicialmente, foi proposto desencadear processo de corrosão acelerada, com diferentes graus de corrosão (expressos em perdas de massa de 5, 10 e 15%) em vigas de concreto armado. Após a corrosão, foram utilizadas técnicas de ensaios não destrutivos (END) para seu diagnóstico em diferentes níveis de corrosão. Em sequência foi realizada a avaliação dos efeitos da corrosão no ensaio de flexão

de vigas de concreto armado e, por fim, foi desenvolvida e avaliada a reabilitação (para os graus de corrosão de 10 e 15%) das vigas corroídas com aplicação dos reforços com UHPFRC e com Concreto Têxtil.

O esquema, apresentado na Figura 1, permite a visualização das etapas constituintes da pesquisa, a fim de propiciar o entendimento global do trabalho.

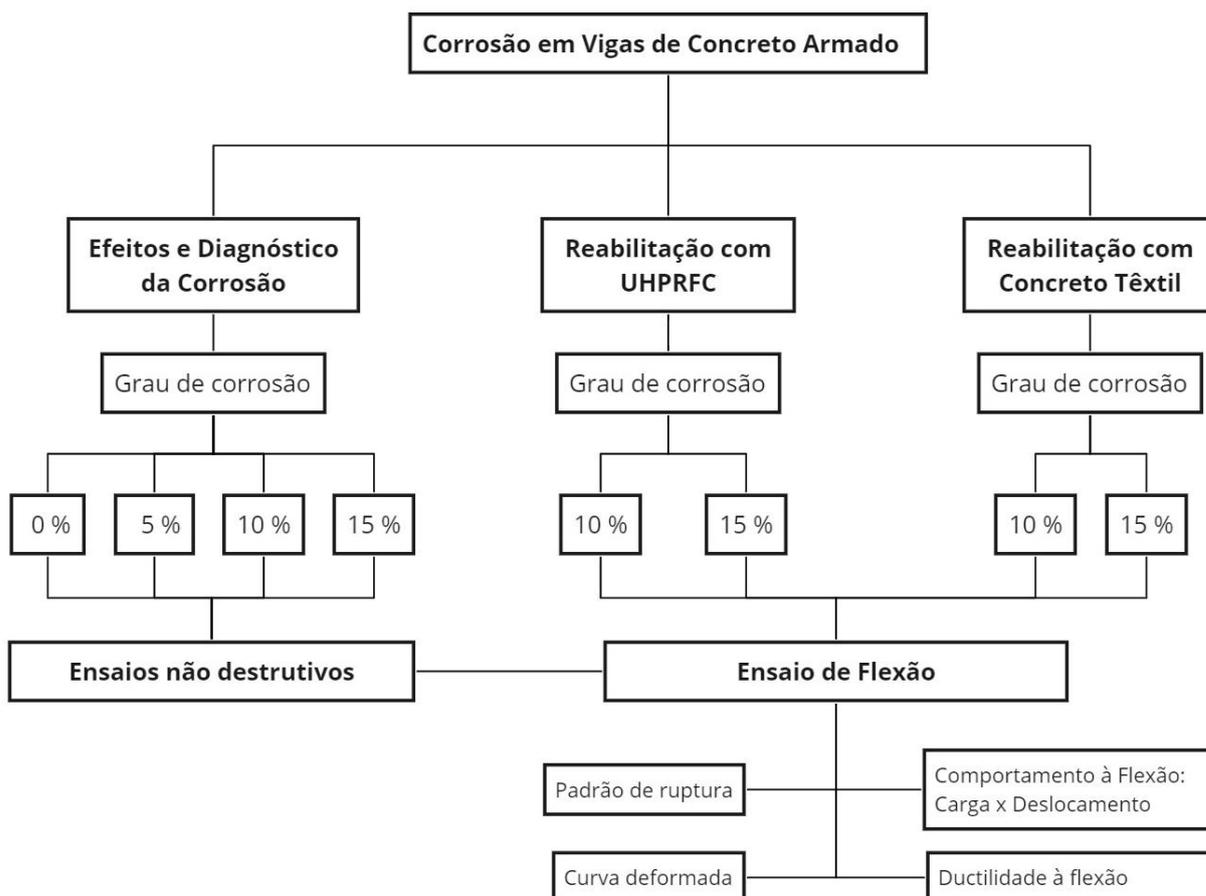


Figura 1: Esquema ilustrativo das etapas da pesquisa

## 1.5 LIMITAÇÕES

As limitações da pesquisa estão relacionadas com a mobilização e o elevado tempo para a realização dos ensaios de aceleração da corrosão, que reduziu o número de variáveis e o seu refinamento e, também, a quantidade de vigas de concreto armado ensaiadas. As limitações da pesquisa estão descritas na sequência:

- a) uso de apenas uma técnica para aceleração de corrosão, baseando-se na metodologia do ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) com aplicação de corrente constante;

- b) utilização de três níveis de corrosão: 5, 10 e 15% de perda de massa;
- c) estudo de apenas uma geometria e disposição de armaduras da viga de concreto armado, nas dimensões de 15 x 30 x 300 cm;
- d) aplicação de um único traço de concreto para as vigas, definido pelo valor da resistência média à compressão de 30 MPa;
- e) reabilitação das vigas corroídas realizada para os graus de corrosão de 10 e 15% de perda de massa;
- f) utilização de um único traço de UHPFRC para a recuperação das vigas de concreto armado corroídas, definido pelo valor da resistência média à compressão de 140 MPa;
- g) emprego de uma única malha têxtil para a recuperação das vigas de concreto armado corroídas.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta o tema da pesquisa, sua contextualização no cenário atual e a sua justificativa. Também apresenta o problema, as questões, objetivos e limitações da pesquisa.

O segundo capítulo é referente à revisão bibliográfica. Este capítulo contém uma breve revisão bibliográfica relativa ao tema da pesquisa. Inicialmente, é abordada a corrosão em estruturas de concreto armado, uma breve descrição sobre seus mecanismos e, em seguida, uma análise dos efeitos da corrosão sobre o comportamento estrutural de elementos de concreto armado. Após, são apresentadas as principais características, propriedades e estudos realizados sobre as duas técnicas de recuperação empregadas nesta tese: UHPFRC e Concreto Têxtil.

No terceiro capítulo, é apresentado o programa experimental. No seu detalhamento, são descritas as variáveis de estudo, os materiais utilizados, a técnica de aceleração da corrosão empregadas, os procedimentos de recuperação das vigas corroídas, os métodos de diagnóstico da corrosão e a metodologia aplicada no ensaio de flexão das vigas de concreto armado.

A análise dos resultados alcançados, ao longo do programa experimental, são apresentados no quarto capítulo. Os resultados, além de apresentados, são discutidos para subsidiar as conclusões da pesquisa. Estas estão relatadas no capítulo 5 do trabalho juntamente com as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo contém uma breve revisão bibliográfica relativa aos temas da pesquisa. Inicialmente, é abordada a corrosão em estruturas de concreto armado, contendo uma breve descrição sobre o mecanismo da corrosão, seguida de análise dos efeitos da corrosão sobre o comportamento estrutural de elementos de concreto armado. Após são apresentadas as principais características, propriedades e estudos realizados sobre as duas técnicas de recuperação empregadas nessa tese: UHPFRC e Concreto Têxtil.

### 2.1 CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: EFEITOS DA CORROSÃO NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

O estudo da corrosão em concreto armado é uma das linhas de pesquisa com maior relevância dentro do Grupo de Pesquisa do Laboratório de Ensaios de Modelos Estruturais (LEME) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O presente capítulo apresenta uma breve revisão dos efeitos da corrosão em estruturas de concreto armado relacionados ao seu comportamento estrutural. Considerando-se o histórico do PPGEC/UFRGS, deixa-se registrados os trabalhos elaborados que apresentam uma revisão aprofundada relativa à corrosão, ou seja, os trabalhos de Andrade (1992; 2001), Adamatti (2016), Caetano (2008), Graeff (2007), Stein (2019). Além destes trabalhos, há vasta bibliografia sobre o tema, como Cascudo (1997), Helene (1993; 2014), Meira (2017), Mehta e Monteiro (2014), Ribeiro e Cunha (2104), Tuutti (1982), entre outros.

#### 2.1.1 Grau de corrosão de estruturas de concreto armado: considerações gerais

Estudos realizados por Apostolopoulos (2007), Apostolopoulos e Michalopoulos (2006), Caprili e Salvatore (2015), Fernandez *et al.* (2015), Gehlen e Weirich (2016), Kashani *et al.* (2015), Li *et al.* (2011), Li *et al.* (2011) e Zhang *et al.* (2012), que avaliaram a influência da corrosão em barras de armaduras de estruturas de concreto armado, incorporadas e não incorporadas no concreto. Os resultados convergem para a comprovação dos efeitos da corrosão nas propriedades mecânicas do aço. A resistência à tração do aço é diretamente afetada pela corrosão. Mas, simultaneamente, ocorre a fragilização do aço e, por consequência, a redução da ductilidade. Sob o ponto de vista de comportamento estrutural, a ductilidade de estruturas é sempre desejável, visto que a falta dela acarreta rupturas frágeis e, por muitas vezes,

imprevisíveis. Como a ductilidade é garantida pelo aço nas estruturas de concreto armado, graus de corrosão, expressos em perda de massa, acima de 5% apresentam relativas perdas nas características citadas (resistência e ductilidade). Porém, estes efeitos deletérios são intensificados por graus de corrosão acima de 10%.

Ressalta-se que esses efeitos foram relatados em estudos nos quais se analisaram somente a influência da corrosão nas barras de aço isoladamente. Por outro lado, os efeitos da corrosão em estruturas de concreto armado, tendem a ser mais graves, uma vez que ocorre, também, a redução da aderência entre a armadura e o concreto. Almusallam *et al.* (1996), Graeff (2017) e Caetano (2008) relatam que a redução da aderência é intensificada com graus de corrosão a partir de 10% e que, em níveis brandos (1,5 a 4,0%), ocorre um acréscimo da aderência entre os dois materiais.

À medida que se analisa a corrosão em estruturas de concreto armado, no caso de elementos submetidos à flexão como vigas, observa-se um comportamento semelhante aos efeitos descritos acima. Porém, já com grau de corrosão na ordem de 5% há redução do desempenho estrutural destes elementos. Ademais, esse efeito de decréscimo do desempenho estrutural é intensificado em graus de corrosão acima de 10%. Tal fato é justificado pela sinergia entre a redução das propriedades mecânicas do aço e a perda de aderência entre o concreto e o aço.

### 2.1.2 Mecanismo de corrosão em estruturas de concreto armado

Tuutti (1982) propôs um modelo fenomenológico do mecanismo de corrosão das armaduras em estruturas de concreto, dividindo-o em duas etapas: iniciação e propagação. De acordo com Cascudo (1997), para o desenvolvimento da corrosão é necessário a ruptura da camada passivadora do aço. Desta forma, Andrade (2001) define a etapa de iniciação como o intervalo de tempo necessário para que agentes agressivos (geralmente gás carbônico ou cloretos) penetrem através do revestimento do concreto e rompam a camada passivadora da armadura.

Cascudo (1997) afirma que, uma vez rompida a camada passivadora, a armadura fica vulnerável à corrosão, dando início a etapa de propagação. Referindo-se a esse período, Meira (2017) ressalta que essa fase da corrosão está relacionada à cinética do processo, ou seja, ao avanço do processo de corrosão. Nessa etapa do mecanismo, é que correm os efeitos deletérios da corrosão. À vista dos estudos desenvolvidos nessa pesquisa, baseados na fase de propagação da corrosão, são apresentados e discutidos os principais efeitos deletérios da corrosão em estruturas de concreto armado.

### 2.1.3 Efeitos da corrosão nas propriedades mecânicas da armadura

Os efeitos da corrosão, nas estruturas de concreto armado, são divididos em três decorrências principais, ou seja, sobre: as propriedades mecânicas das armaduras; a aderência entre as armaduras e o concreto; e a fissuração do concreto. Ressalta-se que os principais relatos encontrados na bibliografia, abordando o tema de corrosão em estruturas de concreto armado, são sobre a perda de aderência entre o concreto e a armadura, quando ocorre perda da monoliticidade da estrutura, reduzindo, assim, a sua capacidade resistente. Outro ponto que é tratado na bibliografia é a fragilização do aço sob processo corrosivo, que reduz a capacidade de deformação quando sob carregamento. À vista disso, as contribuições relativas aos efeitos da corrosão no comportamento estrutural do concreto armado, encontram-se desenvolvidos junto aos temas propriedades mecânicas das armaduras e perda de aderência entre o concreto e a armadura.

Em estruturas de concreto armado, a armadura apresenta-se como um dos principais elementos. A quantidade é resultado de um dimensionamento, muitas vezes complexo, e, geralmente, é expresso em termos de área de armadura necessária. Portanto, entende-se a área de armaduras como um dos principais parâmetros das estruturas de concreto armado (GRAEFF, 2007).

No processo corrosivo, na fase de propagação, há a formação dos produtos de corrosão (óxidos e hidróxidos de ferro) e, como consequência, o consumo da massa das armaduras. Em decorrência, há perda de material e, em função disto, a redução da seção transversal da armadura (CASCUDO, 1997; HELENE, 2014; MEHTA; MONTEIRO, 2014; MEIRA, 2017; RIBEIRO; CUNHA, 2014).

Conforme relatado por Mehta e Monteiro (2014), a corrosão pode afetar a resistência à tração e a ductilidade das armaduras. Ambas as propriedades são importantes, sendo capazes de afetar o desempenho estrutural, alterando desde a capacidade de carregamento até a forma de ruptura.

#### 2.1.3.1 Efeitos na resistência à tração

O comportamento à tração de armaduras corroídas, geralmente, é expressa sob duas formas. Uma delas é referente à seção transversal nominal (ou tensão nominal), considerando a área inicial da armadura, ou seja, antes do processo corrosivo. A segunda considera a redução na seção transversal da armadura gerada pela corrosão, denominada como seção transversal residual (ou tensão de serviço). Convencionalmente, expressa-se os resultados em relação à

seção transversal nominal, pois torna-se mais perceptível a perda de capacidade resistente das armaduras devido ao processo corrosivo.

Almusallam (2001) realizou um estudo experimental sobre as propriedades mecânicas de armaduras corroídas em relação à resistência à tração. Foram analisadas barras de aço com diâmetros nominais de 6 e 12 mm, moldadas em corpos de prova de concreto e imersos, parcialmente, em solução de água com concentração de 5% de cloreto de sódio. Para aceleração da corrosão, foi aplicada uma corrente de 2 mA/cm<sup>2</sup>. Obtido o grau de corrosão pretendido, foram extraídas as barras, removendo quimicamente os produtos de corrosão a elas aderidos, e foi determinada a resistência à tração.

Os resultados obtidos por Almusallam (2001), sobre o efeito da corrosão na resistência à tração das armaduras, estão apresentados na Figura 2, relacionando a perda de massa, devido ao processo corrosivo, e a resistência à tração. O estudo considerou seções transversais nominais de armadura dos diâmetros de 6 e 12 mm. Constata-se, como era esperado, que devido ao avanço do processo corrosivo ocorre a redução da capacidade resistente das armaduras para os dois diâmetros ensaiados. Para perdas de massa acima de 10%, há redução da resistência de forma significativa. Portanto, em estruturas de concreto armado, pode ocorrer uma redução na capacidade portante e, como consequência, falha ou colapso, tendo em vista o decréscimo acentuado da resistência.

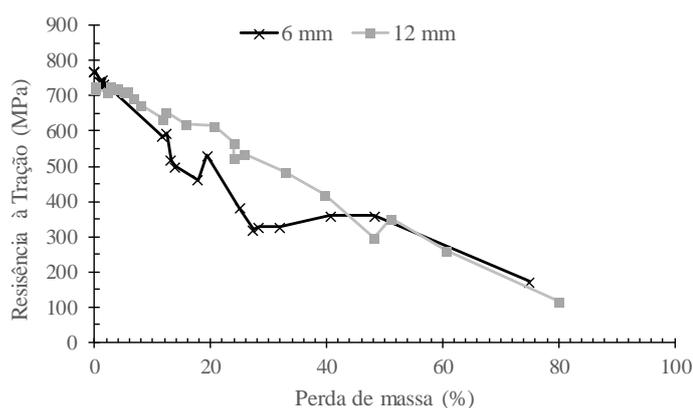


Figura 2: Resistência à tração nominal de barras de aço corroídas

(Fonte: adaptado de ALMUSALLAM, 2001)

Outros dados apresentados por Almusallam (2001), detalhados na Figura 3, são referentes à resistência de barras de aço corroídas, considerando a tensão efetiva de serviço das armaduras. Nas observações do autor, como, também, pode ser observado na Figura 3, constata-se que há pouca alteração dos valores de resistência à tração de serviço em função da perda de massa pelo

processo corrosivo. Salienta-se que o autor considerou o diâmetro efetivo das barras de armadura para o cálculo da resistência à tração.

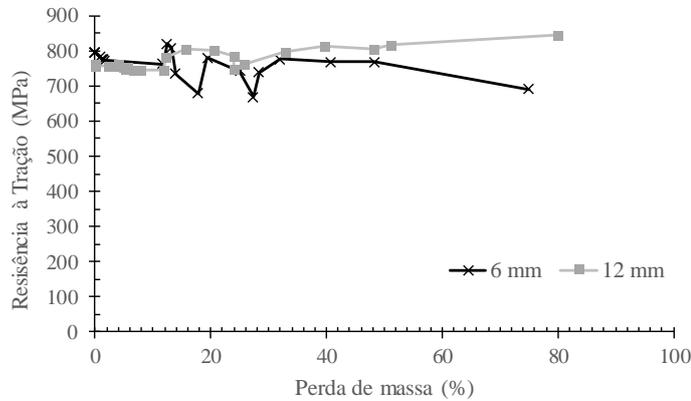


Figura 3: Resistência à tração de serviço de barras de aço corroídas

(Fonte: adaptado Almusallam, 2001)

Diferentemente do estudo realizado por Almusallam (2001), que avaliou a corrosão de barras de aço em corpos de prova de concreto, Apostolopoulos *et al.* (2006) realizaram um estudo do comportamento somente com as barras empregadas no concreto armado, sendo submetidas à tração e expostas ao processo de corrosão em uma câmara de nevoa salina. Na Figura 4 (a), é apresentada a massa residual das armaduras em relação a duração do tempo de exposição.

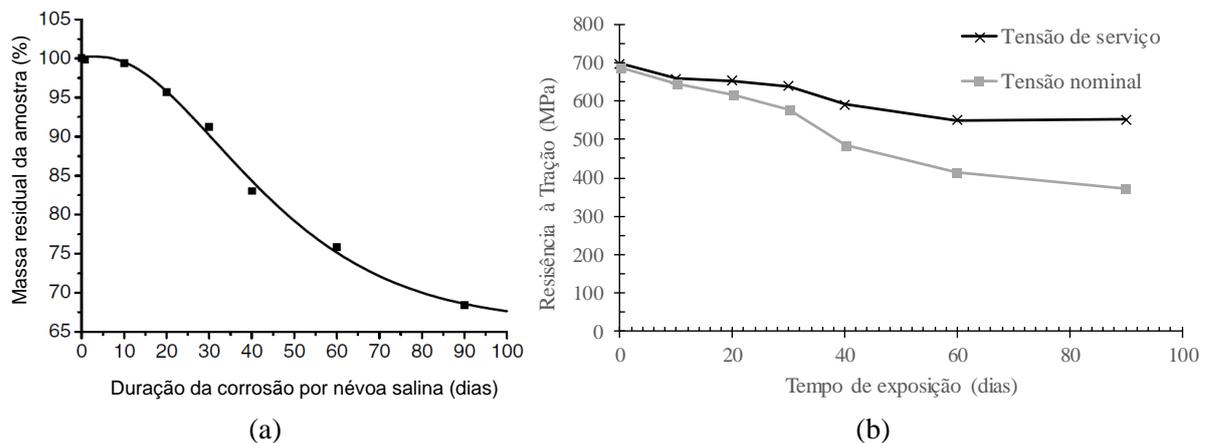


Figura 4: Efeito da duração da exposição à névoa salina na perda de massa (a) e, resistência à tração de barras de aço corroídas por névoa salina (b)

(Fonte: adaptado Apostolopoulos et al. (2006))

A Figura 4 (b) mostra os resultados, obtidos por Apostolopoulos *et al.* (2006), relativos aos efeitos do aumento do tempo de exposição, nos quais se observa decréscimo na tensão nominal (considerando o diâmetro nominal da barra), apresentando comportamento semelhante aos

estudos de Almusallam (2001). Por consequência, como esperado, na tensão de serviço, houve uma redução mais acentuada ao se comparar à armadura sem exposição, estando em conformidade com os dados apresentados por Almusallam (2001).

Percebe-se, pelos estudos realizados por Almusallam (2001) e Apostolopoulos *et al.* (2006), que a resistência à tração de armaduras corroídas apresenta uma redução considerável da tensão nominal. Isto se deve à diminuição da seção transversal, como consequência do processo corrosivo. Tais resultados também são verificados nos estudos realizados por outros pesquisadores (DU; *et al.* 2005; ZHU, 2011).

Os estudos relatados até o momento, nesta revisão bibliográfica, retratam resultados da corrosão através de ensaios acelerados. OU *et al.* (2016) compararam resultados da corrosão acelerada com o processo natural de corrosão e concluíram que as diferenças, no comportamento à tração, não foram significativas, consideradas essas duas situações. No entanto, houve diferença na comparação entre o alongamento final das barras corroídas natural e artificialmente. Os autores relatam que as barras corroídas naturalmente apresentavam alongamentos maiores em comparação as que passaram por processo artificial. Portanto, é conservador usar os comportamentos de tração da corrosão artificial para avaliar a capacidade estrutural residual.

#### 2.1.3.2 Efeitos na ductilidade

A ductilidade representa o grau de deformação que um material suporta até a fratura. Materiais com baixa ductilidade são considerados materiais frágeis, por exemplo, o concreto. Entretanto quando o material se deforma sob ação das tensões aplicadas, ou seja, alonga-se sem romper até um determinado ponto, este é considerado um material dúctil. O aço para concreto armado possui a característica de ser um material dúctil, sendo está uma das propriedades requeridas para o dimensionamento de estruturas de concreto armado, evitando rupturas súbitas e frágeis.

No estudo realizado por Apostolopoulos *et al.* (2006), o efeito da exposição das armaduras para concreto em névoa salina teve um considerável efeito sobre a ductilidade do material. Os pesquisadores expressaram a ductilidade em termos de alongamento até a ruptura, comparando-o em relação ao tempo de exposição, como apresentado na Figura 5 (a). Para exposições acima de 35 dias, o alongamento até a ruptura cai para valores abaixo do limite de 12% que é exigido em recomendações normativas da norma inglesa DIN 488, segundo os autores.

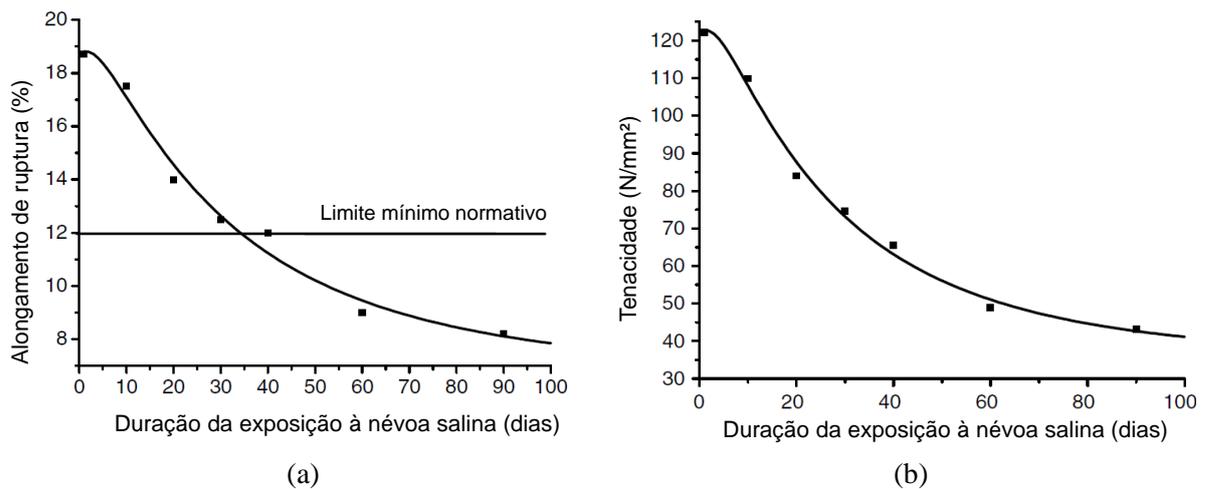


Figura 5: Efeito da duração de exposição à névoa salina sob (a) o alongamento até a ruptura e sob (b) a tenacidade

(Fonte: adaptado de Apostolopoulos *et al.* (2006))

Na Figura 5 (b), observa-se o efeito do tempo de exposição à névoa salina na tenacidade das barras de aço. A redução da tenacidade é relevante e pode representar um sério problema para a segurança das construções, principalmente se a estrutura estiver submetida a carregamentos cíclicos (APOSTOLOPOULOS *et al.*, 2006).

Almusallam (2001) mostra, também, que houve redução da ductilidade das barras de aço de forma significativa. Na Figura 6, pode ser observado que houve uma limitação do alongamento de acordo com o grau de corrosão, ou seja, quanto maior a intensidade da corrosão menor é o alongamento até a ruptura. Para perdas de massa maiores que 12%, conforme Almusallam (2001), as armaduras corroídas apresentam alongamentos menores que 9%, sendo inferior ao especificado pela Norma Americana ASTM A615.

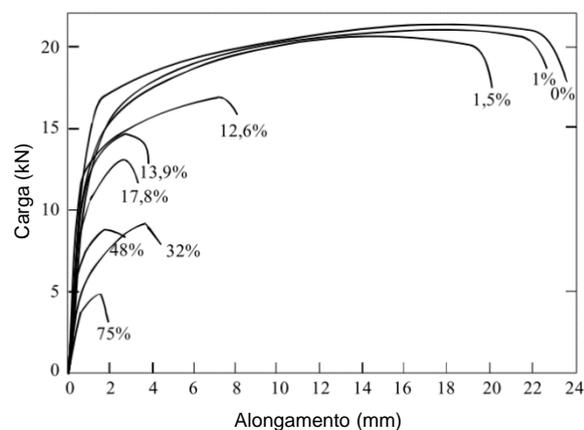


Figura 6: Curvas de alongamento para barras de aço de 6 mm de diâmetro com diferentes graus de corrosão

(Fonte: Almusallam, 2001)

DU *et al.* (2005) obtiveram conclusão semelhante, empregando o mesmo método de aceleração da corrosão de Almusallam (2001). O alongamento até a ruptura diminuiu significativamente com o aumento do grau de corrosão. Houve uma redução de 68% do alongamento com um grau de corrosão de 16,3%.

Pelos estudos realizados por Almusallam (2001), DU *et al.* (2005) e Apostolopoulos *et al.* (2006), pode-se concluir que a corrosão afeta a ductilidade das armaduras, ou, de outra maneira, a corrosão pode fragilizar a armadura.

#### 2.1.4 Influência da perda de aderência entre as armaduras e o concreto

A ligação entre o aço e concreto desempenha uma profunda influência no comportamento estrutural no concreto armado, tanto em estado de serviço quanto no estado último. Desta forma, a aderência entre esses dois materiais é uma das premissas da compatibilidade desses para o funcionamento do concreto armado.

Andrade (1992) descreve que a perda de aderência, pela corrosão do aço, ocorre devido ao maior volume dos produtos de corrosão em comparação ao aço original, formando tensões radiais, que produzem tanto fissuração longitudinal quanto paralela às armaduras corroídas. Desta forma, quando ocorre a fissuração, a aderência entre o concreto e a armadura pode ficar comprometida. Stanish *et al.* (1999) defendem que, além do citado por Andrade (1992), os mecanismos de aderência podem sofrer interferência à medida que a superfície da barra se torna, continuamente, coberta pelos produtos da corrosão.

Fang *et al.* (2004) ressaltam que os produtos da corrosão se alojam na interface entre o aço e o concreto, reduzindo assim a aderência. Por outro lado, segundo Amlch (1996) e Fang *et al.* (2004), em situações específicas, a redução da aderência entre o concreto e a armadura é muito mais crítica que a redução da seção transversal da armadura, ou seja, pode gerar impactos maiores na estabilidade da estrutura.

Porém, circunstâncias em que os produtos de corrosão estão fortemente aderidos à armadura, a corrosão pode contribuir para a resistência de aderência, aumentando (FU; CHUNG,1997). Fang *et al.* (2004) e Almusallam *et al.* (1996) comprovaram esse fato através de corpos de prova, com baixos níveis de corrosão (até 4%), que tiveram um acréscimo da tensão de aderência. Isto é, igualmente, relatado por Graeff (2007). Caetano (2008), por sua vez, descreve

que a tensão de aderência apresenta um leve acréscimo para teores de corrosão pequenos, na ordem de 1,5% de perda de massa.

Na Figura 7 (a), são apresentados os valores, obtidos por Almusallam *et al.* (1996), da força de aderência para níveis de corrosão entre 0 e 4%. A corrosão, em baixos níveis, é capaz de aumentar a força de aderência entre o aço e o concreto, e, neste caso específico, de 61 para 71 kN. Isto significa, em termos de porcentagem, 16,3% a mais do que quando a armadura sem corrosão. Estudos realizados por Cabrera (1996), Fang *et al.* (2004) e Fu e Chung (1997) apresentaram resultados semelhantes em baixos níveis de corrosão. Por sua vez, Choi *et al.* (2014) observaram o mesmo comportamento para diferentes relações água/cimento.

Segundo Almusallam *et al.* (1996), como pode ser observado na Figura 7 (b), quando há um aumento do grau de corrosão, acima de 4%, ocorre uma redução acentuada da força de aderência até estes níveis de corrosão chegarem a 10% que é quando ocorre uma estabilização. No entanto, no estudo de Graeff (2007), a redução da tensão de aderência chegou a alcançar 52%, em corpos de prova com percentual de perda de massa igual a 20%.

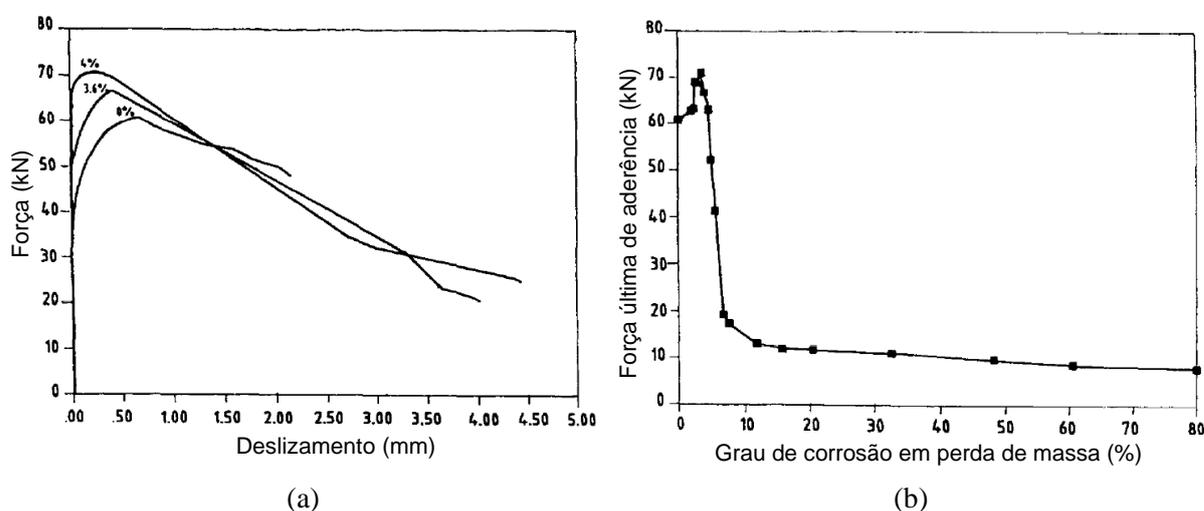


Figura 7: (a) Força de aderência para baixos níveis de corrosão e (b) força de aderência última para diferentes graus de corrosão

(Fonte: Almusallam *et al.*, 1996)

Portanto, verifica-se os efeitos da corrosão na aderência, possuindo níveis críticos quando acima de 4% o grau de corrosão. No entanto, Coronelli (2002) e Caetano (2008) argumentam que a utilização de armadura transversal pode reduzir a perda de aderência. Perda provocada pela falta de confinamento, derivada da abertura de fissuras pelo processo corrosivo. As diferenças

de comportamento, na presença de armaduras transversais, podem ser motivadas pela forma como ocorre a perda de aderência, o modo de falha e o valor da tensão residual.

Coronelli *et al.* (2011) e Hanjari *et al.* (2011) realizaram ensaios de arrancamento de armaduras corroídas, simulando a ancoragem em seções de extremidade de vigas com a presença de armaduras transversais. Os resultados mostraram que os estribos desempenharam um papel muito importante na ancoragem das barras corroídas. Conforme os autores destes estudos, os estribos proporcionaram a principal fonte de confinamento quando houve a fissuração da camada do cobrimento induzida pela corrosão. Os resultados obtidos por estes autores estão de acordo com as considerações de Coronelli (2002) e Caetano (2008).

Em vista dos pontos descritos nesse item, referente à influência da corrosão na aderência entre as armaduras e o concreto, observa-se, pelos resultados, que níveis de corrosão de até 4% aumentam a aderência entre os materiais. Entretanto, níveis de corrosão acima de 4% prejudicam intensamente a aderência. Além disto, foi citada a influência da presença de armadura transversal que atenua os efeitos da corrosão na aderência.

### 2.1.5 Efeitos da corrosão no comportamento à flexão do concreto armado

A corrosão do aço acaba afetando diretamente as propriedades do próprio material, como abordado no item 2.1.3, e, também, por esse mesmo mecanismo da corrosão, ocorrem efeitos danosos à aderência entre o concreto e o aço (discutido no item 2.1.4). A combinação destes efeitos, resultam em danos ponderados em estruturas de concreto armado. Elementos submetidos à flexão, como é o caso de vigas, tendem a apresentar efeitos deletérios acentuados, visto que são diretamente dependentes das propriedades mecânicas do aço e da aderência entre o concreto e a armadura.

Em relação aos efeitos da corrosão no comportamento à flexão de elementos de concreto armado, Kanchan Devi *et al.* (2017) concluem que a corrosão da armadura reduz a capacidade de carga e a ductilidade de vigas de concreto armado. A conclusão foi baseada em um estudo com vigas de concreto armado, submetidas à corrosão de 10, 25 e 30%. O comportamento da relação entre carga e deslocamento está apresentado na Figura 8. Os autores registram que a corrosão reduz a carga máxima em 9,9%, 33,9% e 43%, respectivamente, para 10%, 25% e 30% de corrosão das armaduras. Além disso, destacam que há uma queda na ductilidade além do nível de corrosão de 10%.

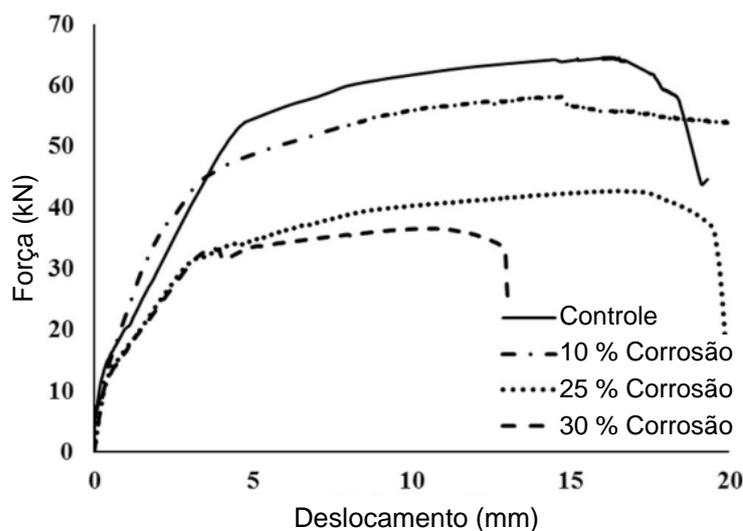


Figura 8: Relação carga x deslocamento obtida da flexão de quatro pontos para diferentes níveis de corrosão

(Fonte: Kanchana Devi *et al.*, 2017)

A falta de padronização dos ensaios de flexão, em elementos de concreto armado corroídos, dificulta a comparação entre o resultado de diferentes pesquisas. Kanchana Devi *et al.*, (2017), utilizaram uma viga com seção de 100 mm x 100 mm x 500 mm (base, altura e comprimento) e foram utilizadas três barras de 8 mm na armadura positiva. Graeff (2007), por sua vez, utilizou vigas de 70 mm x 140 mm x 1300 mm (base, altura e comprimento) com duas barras de 8 mm na armadura positiva. Graeff (2007) constatou uma redução de, aproximadamente, 50% da capacidade portante com um grau de corrosão de 20%, obtendo uma perda acima do apresentado por Kanchana Devi *et al.*, (2017). Stein (2019) relatou uma redução de 22,7% na capacidade de carregamento em vigas com, aproximadamente, 10% de corrosão, utilizando vigas de 100 mm x 200 mm x 1500 mm (base, altura, comprimento) com duas barras de 12,5 mm de armadura positiva.

Em relação à corrosão das armaduras negativas, submetidas à compressão no esforço de flexão, Castel *et al.* (2000) concluíram que as fissuras geradas pela corrosão das armaduras negativas não influenciam, significativamente, nas características mecânicas das vigas de concreto armado. Os mesmos autores constaram uma redução da ductilidade de vigas corroídas de até 70%.

Apesar, da já citada, falta de padronização dos ensaios de flexão, é perceptível os efeitos deletérios relativos à perda da capacidade portante de vigas de concreto armado corroídas. Em vista do comprometimento estrutural, o processo de recuperação, destas estruturas corroídas,

passa a exercer um papel fundamental na restauração do desempenho estrutural. Assim, frente a essa importância, materiais e técnicas de recuperação devem ser avaliados com cautela.

## 2.2 CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AOS PROCEDIMENTOS DE RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS

Dentro da construção civil, há vários métodos para a recuperação de estruturas de concreto armado afetadas por corrosão das armaduras (CASCUDO, 1997). Os procedimentos de recuperação devem ser observados por duas óticas distintas: vida útil e desempenho estrutural. O método a ser utilizado para a recuperação deve, portanto, garantir a vida útil da estrutura e, ao mesmo tempo, fazer com que seja recuperada a sua capacidade estrutural.

Quando analisada a recuperação da corrosão sobre o ponto de vista da vida útil, diversos materiais são utilizados a fim de proteger e assegurar a durabilidade do sistema. Os materiais são selecionados devido às suas propriedades (resistência, aderência, porosidade, retração) e características (trabalhabilidade, técnica executiva, cura). Entre as possibilidades há, entre outros, argamassas com adições pozolânicas, grouts, argamassas poliméricas e argamassas tixotrópicas. Em síntese, deve ser empregado um material com características e propriedades compatíveis com os requisitos mecânicos, de durabilidade e de execução para cada caso.

Em relação ao desempenho estrutural, a recuperação dos efeitos da corrosão das barras de aço, é relativo ao grau de corrosão da armadura, expressa em termos de redução da seção transversal. Considera-se como referência valores de 10%: reduções menores que 10% são situações consideradas em separado daquelas maiores ou iguais a 10%.

Helene (1986), Cascudo (1999) e Ribeiro (2018), entre outros, recomendam que em situações com redução menor que 10% da seção transversal da armadura, somente se realize o processo de tratamento da corrosão, sem necessidade de reforço ou recuperação. Esse processo envolve a remoção da camada de cobrimento do concreto, remoção dos produtos de corrosão da armadura, aplicação de uma camada de proteção na armadura e recomposição da seção do elemento de concreto armado. Esse procedimento é indicado tendo em vista que reduções menores que 10% não afetam significativamente o desempenho estrutural.

Entretanto, quando há perda da seção transversal da armadura, devido à corrosão, maior ou igual a 10%, é indicado o processo de recuperação estrutural e/ou reforço (CASCUDO, 1997). O procedimento de recuperação mais difundido é a substituição da armadura comprometida pelo processo corrosivo por outra de mesmo diâmetro. Porém deve ser ancorada em uma região sem corrosão, respeitando as condições de emenda por transpasse de barras. Essa técnica de recuperação é uma das mais simples de ser realizada, porém, ao mesmo tempo, demanda um tempo de recuperação e de execução maior devido ao processo de substituição e de ancoragem das barras.

Alternativamente a esse procedimento, tem-se a realização de reforços estruturais em elementos corroídos. O procedimento de reforço consiste, basicamente, em recuperar a corrosão (conforme procedimento com redução menor que 10%) e dimensionar/executar reforços de acordo com a capacidade estrutural comprometida, devido à corrosão das armaduras. Diversas técnicas de reforços podem ser utilizadas, com por exemplo, recuperação com acréscimo de armadura, reforços com fibras poliméricas, chapas coladas, perfis metálicos, entre outros.

No caso de novas propostas, estudos devem ser desenvolvidos a fim de avaliar o potencial destas soluções inovadoras para a recuperação de estruturas de concreto armado corroídas. Em vista dos objetivos desta pesquisa, as recuperações com o uso do UHPFRC e de Concreto Têxtil tiveram essa finalidade. Inicialmente, foi desenvolvida revisão bibliográfica sobre estes materiais e suas potencialidades para aplicação na recuperação de estruturas de concreto armado corroídas.

### 2.3 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS: UHPFRC

Nos últimas décadas, novos métodos de construção, usando materiais estruturais de alto desempenho, têm sido estudados, incluindo novos tipos de concreto. As propriedades desses materiais incluem uma elevada resistência à compressão, à tração, à flexão e, também, alta ductilidade (RICHARD; CHEYREZY, 1995; BONNEAU *et al.*, 1996; STOICA, 1996). Acrescenta-se, a isto, serem materiais com elevada durabilidade (FÁVERO, 2016).

O desenvolvimento de novos tipos de concretos surge de necessidades específicas ou de aprimoramento de determinadas propriedades. Dentro dessa linha há o concreto reforçado com fibras (CRF), que visa aumentar a resistência à tração do concreto com incorporação de fibras.

Para elevar a ductilidade de materiais cimentícios, foi desenvolvido o ECC (*Engineered Cementitious Composites*). Em relação à resistência, ocorreu a elaboração de concretos de alta resistência (HPC – *High Performance Concrete*) que são focados em alcançar resistências elevadas e, na mesma linha, há os concretos de ultra-alta resistência (UHPC – *Ultra High Performance Concrete*) que visam concretos com resistências superiores a 100 MPa. Buscando o aprimoramento das propriedades mecânicas, foi desenvolvido o concreto de pós reativos (RPC – *Reactive Powder Concrete*). Estes se baseiam no princípio de ter um material com o mínimo de defeitos, através da redução da heterogeneidade, da eliminação do agregado graúdo, do aumento da compactidade, entre outros fatores. E, atualmente, há um novo tipo de concreto com desenvolvimento em ascensão, sendo denominado de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras, designado por UHPFRC (*Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete*).

Basicamente, o UHPFRC consiste em unir diversas características de outros tipos de concretos especiais em um único material. Por exemplo, dos:

- a) concretos de pós reativos, o mínimo de defeitos possíveis;
- b) concretos reforçados com fibras: aumento da resistência à tração;
- c) ECC: alta ductilidade;
- d) concretos de ultra-alto desempenho: elevada resistência à compressão e altos parâmetros de durabilidade.

Estudos indicaram que o UHPFRC possui propriedades mecânicas diferenciadas e superiores aos concretos convencionais. Dentre as propriedades aprimoradas, deve-se destacar a resistência à compressão, até dezesseis vezes maior que a de concretos convencionais, e a resistência à tração, cerca de dez vezes superior aos valores típicos até então obtidos. Com a incorporação de fibras de aço, é possível obter um material com comportamento dúctil e tenacidade 250 vezes maior que o usual (RICHARD; CHEYREZY, 1995; BONNEAU *et al.*, 1996; STOICA, 1996). Em paralelo às excelentes prioridades mecânicas, os UHPFRC apresentam elevada durabilidade em comparação aos concretos convencionais. O material possui taxas de corrosões 120 vezes menores, além de baixíssima permeabilidade ao ar e difusão de íons de cloreto: sessenta vezes menores (BENJAMIN, 2005; VOO *et al.*, 2012).

O interesse pela aplicação desse material inovador, em diferentes campos, tem atraído a atenção das áreas acadêmica e prática da Engenharia. Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito

de caracterizar, normatizar, entender os limites de aplicação do material e viabilizar seu custo de fabricação. Deste modo, diversos estudos foram, e estão sendo realizados pelo Grupo de Pesquisa do LEME/UFRGS. Reginato (2011) propôs a aplicação de métodos de empacotamento de partículas para dosagem deste tipo de concreto. Fávero (2016) fez um amplo estudo focado na otimização desse tipo de concreto, fornecendo subsídios e dados relativos às propriedades e custos do material. E, mais recentemente, Agüero (2019) desenvolveu um estudo numérico e experimental de vigas utilizando UHPFRC.

Uma estratégia para viabilizar o uso do UHPFRC, visto que o custo é um fator que deve ser levado em consideração, é a otimização estrutural procurando desenvolver elementos e técnicas que utilizem ao máximo as propriedades deste concreto. Outra consideração a ser feita é sobre a conveniência de sua aplicação, sendo recomendado para locais ou condições específicas que justifiquem elevado custo pelo ganho de desempenho. Portanto, esta pesquisa verificou a possibilidade da aplicação do UHPFRC na recuperação de estruturas de concreto armado corroídas.

Para isso, a seguir, é apresentada uma revisão sucinta das propriedades e características do UHPFRC necessárias para essa aplicação específica, ou seja, na recuperação de estruturas de concreto armado corroídas. Informações mais abrangentes sobre os UHPFRC podem ser consultadas nos estudos de Biz (2001), Vanderlei (2004), Reginato (2011), Christ (2014), Fávero (2016), Christ (2019) e Agüero (2019).

### 2.3.1 Propriedades mecânicas

Ao contrário do concreto convencional, o UHPFRC não rompe após atingir sua resistência máxima, devido ao efeito das fibras: apresenta um comportamento dúctil. O material tem comportamento elástico até a formação da primeira fissura e, após, as fibras passam a controlar o comportamento mecânico do material. O comportamento pós-fissuração depende do número, da orientação, do tipo e da distribuição das fibras. Esse comportamento é descrito nos itens seguintes, relacionando às propriedades mecânicas do material.

#### 2.3.1.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma propriedade importante no projeto de qualquer estrutura de concreto. É, também, a propriedade que é aferida com maior frequência. Graybeal e Russel (2013) afirmam que os métodos de ensaio da resistência à compressão, com corpos de prova

cilíndricos para concreto convencional, são apropriados para a determinação da resistência à compressão do UHPFRC, mas podem ser necessárias pequenas modificações nos métodos de ensaio e análise.

A avaliação da resistência à compressão não deve ser realizada simplesmente através de um parâmetro numérico, ou seja, observando somente o valor obtido. Portanto, um concreto submetido a esforços de compressão deve ter essa propriedade analisada com profundidade. Um dos métodos para compreender o comportamento de concretos submetidos aos esforços de compressão é por meio de diagramas tensão-deformação. Agüero (2019), como se sabe dos estudos básicos nesta área, descreve que, esta abordagem de avaliação, é amplamente utilizada, principalmente para relacionar a resistência à compressão com o módulo de elasticidade, apresentando uma visão geral do comportamento do material. O comportamento típico do UHPFRC, quando submetido à compressão, pode ser observado na Figura 9.

O gráfico tensão x deformação exibe uma relação elástico linear, com uma ampla faixa de deformação, até atingir o valor máximo de resistência à compressão. Após o pico, a relação não é mais linear, ocorrendo a suavização da curva (*strain softening*). A resposta plástica pós *strain softening* é altamente influenciada pelo teor de fibras da mistura. Se o teor é inferior a 2%, a deflexão da curva é acentuada (SIMON, 2011; HUSSEIN, AMLEH, 2018).

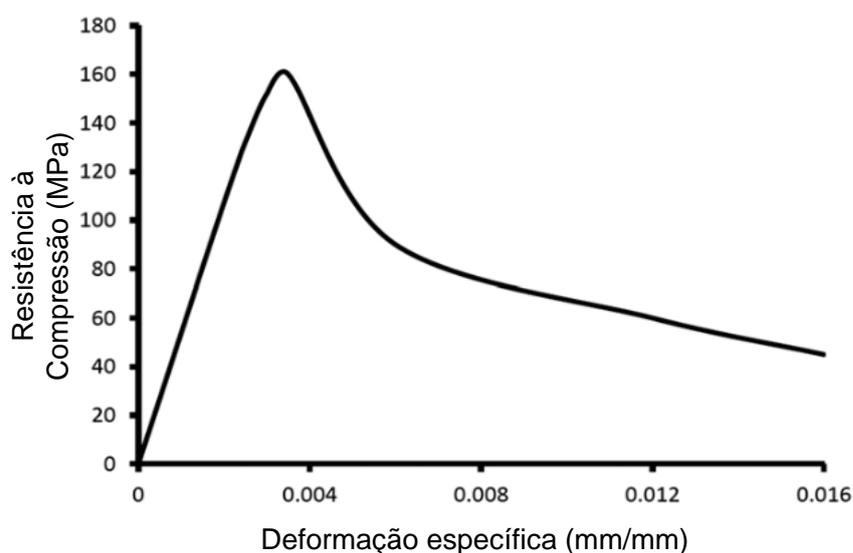


Figura 9: Curva de tensão de compressão nominal para UHPFRC

(Fonte: Hussein e Amleh, 2018)

### 2.3.1.2 Módulo de elasticidade

Graybeal (2006) registrou o módulo de elasticidade à compressão do UHPFRC, de acordo com ASTM C469, em idades de 1 a 56 dias. O estudo inclui, também, a avaliação de diferentes condições de cura e faixas de resistência à compressão. Para acelerar o ganho de resistência foi utilizado o processo de cura à vapor, intensificando as reações pozolânicas.

No que se refere ao módulo de elasticidade à tração, os valores médios medidos foram de 51,9 GPa, para amostras tratadas com vapor e, 47,6 GPa, para amostras sob condições normais de cura (GRAYBEAL, 2006). Esses valores foram ligeiramente superiores aos obtidos na compressão, em vista disso, alguns autores utilizam o valor do módulo à tração igual ao módulo de compressão (GRAYBEAL; RUSSEL, 2013; HUSSEIN; AMLEH, 2018).

Graybeal (2006) relata que, após a cura a vapor, os valores do módulo de elasticidade foram de, aproximadamente, de 50 GPa em 28 dias. Já para corpos de prova curados sob condições normais de laboratório, os valores, foram de 42,7 GPa em 28 dias. Logo, é perceptível a influência das condições de cura no módulo de elasticidade do UHPFRC.

Diversas relações entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do UHPFRC, incluindo fatores como cura, presença de agregados graúdos e idade, podem ser consultados em Graybeal (2006), Graybeal e Russel (2013), Ma *et al.* (2004) e Alsalman *et al.* (2017).

### 2.3.1.3 Resistência à tração

O comportamento à tração do UHPFRC é linear até o formação da primeira fissura, após, o comportamento é controlado pelas fibras. Quando ocorre o aumento da abertura das fissuras, a tensão nas fibras também aumenta, até atingir sua resistência máxima à adesão. Neste ponto, as fibras começam a deslizar dentro da matriz de concreto (AGUERO 2019).

Graybeal e Baby (2013) propõem o comportamento tensão x deformação na tração idealizada na Figura 10. É proposto como uma ilustração conceitual da resposta tensão-deformação pré e pós-fissuração. O comportamento é dividido em quatro fases.

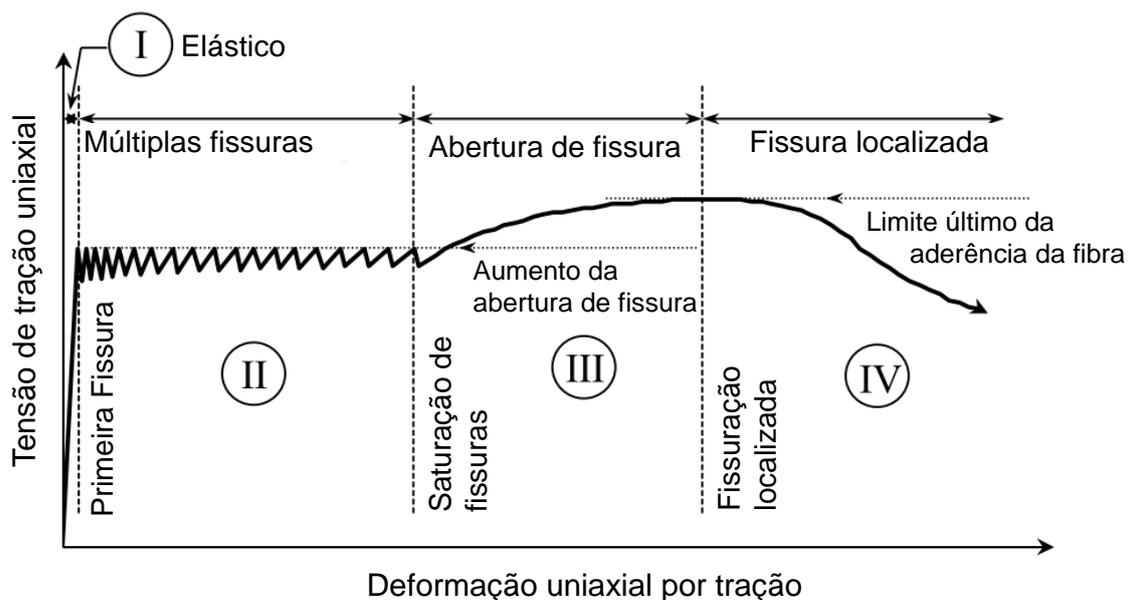


Figura 10: Resposta mecânica de tração uniaxial idealizada de UHPFRC

(Fonte: Graybeal e Baby, 2013)

Na fase I, o comportamento elástico. A fase II é caracterizada pela formação de várias fissuras individualmente, pois a tensão na matriz excede a sua resistência à fissuração. A fase III começa no nível de deformação, quando surgem fissuras adicionais entre as pré-existentes. Por último, a fase IV começa quando uma fissura individual atinge seu limite de deformação e as fibras que costumam as fissuras começam a se desprender da matriz (GRAYBEAL; BABY, 2013; GRAYBEAL; RUSSEL, 2013).

Verifica-se, nos estudos realizados por Graybeal e Baby (2013), Graybeal e Russel (2013), Fávero (2016) e Agüero (2019), que a resistência à tração direta do UHPFRC é compreendida na faixa de 6 a 10 MPa. Nesse contexto, a aplicação do UHPFRC como material de recuperação, em estruturas de concreto armado corroídas, pode representar um incremento de capacidade estrutural, não apenas em elementos submetidos à compressão, mas, também, em elementos com esforços de tração.

### 2.3.2 Durabilidade

De acordo com a ISO 6241 (ISO, 1984), durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Dessa forma, a durabilidade não pode ser considerada uma propriedade inerente à estrutura ou material, de modo que estruturas, com mesmas características, podem apresentar, ao longo do tempo, durabilidades

diferentes. Em consequência, ao ser avaliada a durabilidade do concreto, são utilizados vários parâmetros a fim de avaliar, de forma comparativa, diferentes tipos de concretos.

O UHPFRC possui características, significativamente, superiores de durabilidade as dos concretos convencionais. As propriedades intrínsecas do próprio material, ou seja, baixa relação água/aglomerante, elevada compacidade, baixa porosidade, entre outras, levam ao melhor desempenho.

Graybeal (2006) relatou algumas conclusões sobre estudos de durabilidade do UHPFRC, sendo inócuas no ensaio de reação álcali-sílica e impermeável à agentes químicos anticongelantes (ASTM C672). Quanto à penetração de cloretos, é classificado com risco muito baixo ou desprezível de penetração de íons, pois apresenta carga passante abaixo de 360 Coulombs (cura ambiente) e, de 50 Coulombs (cura à vapor) na idade de 28 dias.

Graybeal e Russel (2013) elaboraram uma revisão do estado da arte do UHPFRC e apresentam uma série de estudos relativos à durabilidade. Concluíram que a matriz densa do material evita que soluções deletérias penetrem na concreto e, portanto, os mecanismos que podem causar deterioração, no concreto convencional, não são observados. Consequentemente, as propriedades de durabilidade avaliadas através de testes de permeabilidade, de congelamento, de descongelamento, de incrustação, de abrasão, de reação álcali-sílica e de carbonatação, são, significativamente, melhores do que as do concreto convencional. Assim, por estas conclusões de Graybeal e Russel (2013), verifica-se que o UHPFRC é um material com parâmetros de durabilidades elevados. Desta forma, a aplicação como material de recuperação, em estruturas de concreto armado corroídas, poderá representar uma extensão da vida útil destas.

### 2.3.3 Aplicação do UHPFRC em recuperação de estruturas de concreto armado

A recuperação de estruturas com UHPFRC é uma solução que pode ser adicionada às técnicas já existentes, contribuindo com vantagens exclusivas em decorrência de suas características mecânicas. Resistências à compressão e à tração, assim como, seu módulo de elasticidade, são algumas propriedades que promovem o uso de UHPFRC para a recuperação. O fato de ser um concreto autoadensável simplifica seu uso em espaços confinados ou em formas complexas (THIBAUX, 2011).

Thibaux (2011) cita que o UHPFRC tem sido utilizado para reforçar e reabilitar, por exemplo, pontes, viadutos, edifícios garagem e estruturas hidráulicas. Massicotte e Boucher-Proulx

(2011) desenvolveram um programa experimental para avaliar a aplicação do UHPFRC, no reforço de pilares de concreto armado, frente às ações sísmicas. Concluíram que há um notável aumento do desempenho destes pilares, alterando o seu comportamento de frágil para dúctil.

Denarié e Brihwiler (2006) destacam que devido à permeabilidade extremamente baixa do UHPFRC, associada às suas excelentes propriedades mecânicas, tornam o material especialmente adequado para reforçar localmente estruturas de concreto armado, novas ou existentes, em zonas sujeitas a um ambiente agressivo e a significativos esforços mecânicos. Nesse sentido, Habel (2004) propôs três aplicações do UHPFRC para reabilitação e recuperação de pontes de concreto armado e estão ilustradas na Figura 11. São elas, para:

- a) fins de proteção e aumento da durabilidade;
- b) proteção ou, adicionalmente, recuperação da resistência;
- c) para proteção e aumento da resistência

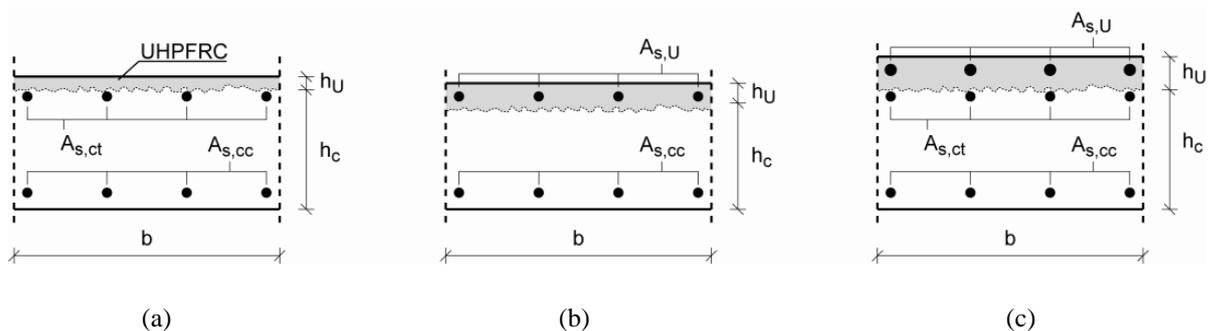


Figura 11: Configurações de reabilitação e recuperação: (a) para função de proteção, (b) para proteção e em alguns casos recuperação da resistência e (c) para aumento da resistência e função de proteção

(Fonte: Habel 2004)

A primeira configuração proposta por Habel (2004), Figura 11 (a), refere-se a uma seção de concreto com uma camada fina de UHPFRC: configuração usada quando não há deterioração da armadura. A segunda, Figura 11 (b), representa o caso em que a armadura de tração é colocada na camada UHPFRC para substituir as armaduras existentes fortemente deterioradas por processo corrosivo. Por fim, a terceira configuração, Figura 11 (c), é projetada para aumentar a resistência do elemento estrutural: a seção transversal consiste em uma seção de concreto armado e uma camada de UHPFRC, reforçada com armaduras, que é, também, utilizada para a proteção do concreto original. O estudo de Habel (2004) limitou-se a testes de laboratório e modelagem numérica, indicando que os resultados foram promissores, ou seja, o UHPFRC melhora o desempenho dos elementos estruturais. O autor acrescenta que a execução

da recuperação não se difere, significativamente, da recuperação com groute ou outro tipo de concreto autoadensável.

No estudo experimental, desenvolvido nesta tese, foi explorada, com profundidade, a solução apresentada na Figura 11 (b). Ao invés da substituição da armadura corroída por uma nova, foi testada a recuperação da capacidade estrutural através do próprio UHPFRC. Esse novo procedimento visa o aprimoramento da técnica de recuperação com utilização do concreto ultra-alto desempenho reforçados com fibras.

## 2.4 CONCRETO TÊXTIL

Dentro da Construção Civil, o concreto armado é o material mais utilizado para aplicações estruturais. A combinação das resistências à compressão do concreto e à tração do aço resultam em uma capacidade de carga adequada para aplicações desta área (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Baseando-se no princípio do concreto armado, surgiu o desenvolvimento de um novo material composto, chamado de concreto reforçado com têxteis (TRC – *Textile Reinforced Concrete*), no qual os tecidos multiaxiais são usados em combinação com o concreto (BRAMESHUBER e BROCKMANN, 2012). Nesse caso, entende-se por concreto uma matriz cimentícia, composta por aglomerantes e agregados miúdos, que, mesmo com características diferentes do concreto convencional, é, usualmente, chamada de concreto, por apresentar características mecânicas próximas àquela.

O uso do Concreto Têxtil viabiliza o projeto de elementos estruturais com seções reduzidas, associando adequadas resistências à compressão e à tração. Além de poder estar presente no projeto de novas estruturas, o Concreto Têxtil pode ser aplicado como material de reforço e recuperação de estruturas existentes.

Como já citado, o Concreto Têxtil é formado por dois materiais, a matriz cimentícia e a malha têxtil. Em relação a malha têxtil, Brameshuber e Brockmann (2012) descrevem que a malha é composta por tecidos poliméricos de elevada resistência, como fibras de vidro, de carbono e de aramida. Os tecidos são colocados na direção da tensão principal, tendo uma eficácia maior em comparação com o uso de fibras curtas.

No cenário brasileiro, a utilização do Concreto Têxtil ainda não é uma realidade. Em termos de pesquisa, poucos trabalhos foram desenvolvidos (RAMBO, 2016; DENARDI, 2016; MORASSUTTI, 2016; NORA, 2018; GEISE, 2019). Destaca-se que, dos trabalhos acima citados, quatro deles foram desenvolvidos no LEME, pelo Grupo de Pesquisa em Concretos Têxteis (CONTEXT), no âmbito do Núcleo de Excelência em Concretos Especiais (NEXCES) da UFRGS.

Um dos objetivos desta pesquisa é a aplicação do Concreto Têxtil para a recuperação de estruturas de concreto armado corroídas. Neste capítulo, é apresentada uma sucinta revisão bibliográfica sobre o Concreto Têxtil, aplicado como um material de reforço e recuperação de estruturas de concreto armado. São abordados tanto o comportamento do Concreto Têxtil quanto os principais estudos desenvolvidos nesse campo de sua aplicação. Informações mais aprofundadas sobre o Concreto Têxtil, envolvendo requisitos das matrizes cimentícias, tipos de malha têxteis, aberturas das malhas e outras características, podem ser consultadas em Denardi (2016), Morassutti (2016), Nora (2018) e Giese (2019).

#### 2.4.1 Nomenclatura

Giese (2019) apresentou discussão sobre a nomenclatura para a técnica do Concreto Têxtil. Inicialmente, constatou que há uma variação quanto à nomenclatura empregada na literatura. O termo Concreto Têxtil, de forma geral, faz referência a um concreto que possui como armadura uma malha têxtil. Indica que a bibliografia internacional usa de forma mais recorrente os termos *Textile Reinforced Concrete* (TRC) e *Fabric Reinforced Cementitious Matrix* (FRCM).

Donnini, Cornaldesi e Nanni (2016) propuseram duas diferentes nomenclaturas conforme o uso de materiais têxteis: um é aplicado como um novo tipo de material estrutural e, o outro, como uma forma de melhorar a resistência de elementos convencionais de concreto armado. Frente a essas definições, os autores empregam o termo Concreto Têxtil (TRC) como um material cimentício reforçado com têxteis, utilizado para execução de novas estruturas ou produtos. Nesses casos, os têxteis exercem a função do aço dentro do concreto armado. A segunda forma de se referir a este concreto, diz respeito à aplicação desta técnica emergente direcionada para reforços e recuperação de estruturas de concreto armado. Segundo Giese (2019), diversos trabalhos associam a técnica de reforço e recuperação com Concreto Têxtil à nomenclatura de *Textile Reinforced Mortar* (TRM).

Logo, definiu-se que para este trabalho será utilizado o termo Concreto Têxtil (CT), como equivalente ao nome TRM, para a recuperação de estruturas utilizando esta técnica. No caso específico desta pesquisa, para a recuperação de vigas corroídas.

#### 2.4.2 Concreto Têxtil como material de reforço

O Concreto Têxtil, como citado anteriormente, é composto por dois materiais principais: matriz cimentícia e a malha têxtil. Cada material exerce um papel no comportamento do compósito. Referindo-se às matrizes cimentícias, Brameshuber e Brockmann (2006) destacam que, geralmente, as matrizes atendem a demandas especiais em relação aos processos de produção e de execução e às propriedades mecânicas e de durabilidade. Na maioria dos casos, segundo os autores, são utilizados agregados com dimensão máxima de 2 mm. Este é um aspecto essencial pois é necessária a penetração da matriz entre as tramas dos têxteis para garantir aderência e comportamento monolítico em situações de carregamentos. Outro fator que deve ser levado em consideração, na definição da matriz cimentícia, é o módulo de elasticidade, especialmente se o Concreto Têxtil for utilizado para aplicação em reforços.

O segundo material componente do Concreto Têxtil, não menos importante, são as malhas têxteis ou as fibras poliméricas. Gries *et al.* (2006) destacam que as propriedades, a quantidade e a disposição das malhas têxteis utilizadas têm grande influência nas características do compósito. Portanto, quando usado como reforço, para ser eficaz necessita de um módulo de elasticidade da malha têxtil superior ao módulo da matriz cimentícia. Caso contrário, a ocorrência precoce de fissuras reduziria drasticamente a rigidez do material de reforço.

Diversos materiais poliméricos são utilizados para confecção das malhas têxteis. Pode-se destacar as malhas de fibras de vidro álcali-resistentes, de carbono e de aramida. Fibras de carbono não apresentam adesão tão eficiente à matriz cimentícia, se comparadas às fibras de vidro, porém o carbono apresenta elevada resistência à tração e elevado módulo de elasticidade. Fibras de aramida possuem maior resistência ao impacto e menor densidade, porém não existem muitos estudos da aplicação deste tipo de malha têxtil (GRIES *et al.*, 2006).

Hegger *et al.* (2006) esclarecem que o comportamento do Concreto Têxtil depende não apenas das características da matriz e da malha têxtil, mas, também, da aderência entre elas. Quando o Concreto Têxtil é submetido a carregamento uniaxial de tração, há o aumento das tensões de tração impostas ao material e ocorre a fissuração da matriz cimentícia e, a partir deste instante,

os esforços passam a ser resistidos, somente, pela malha têxtil. Esse comportamento é mostrado na Figura 12.

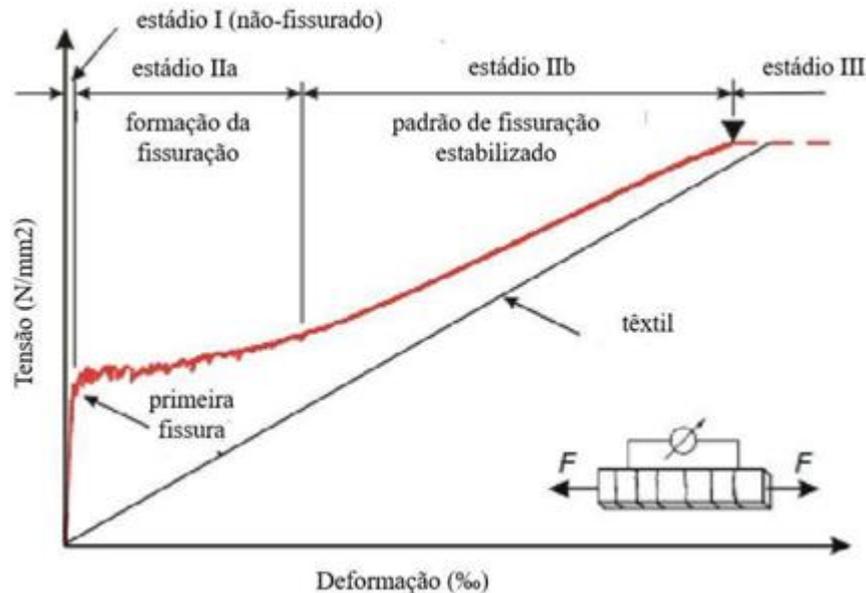


Figura 12: Tensão-deformação teórica do Concreto Têxtil sob carregamento uniaxial

(Fonte: Hegger *et al.* 2006 , adaptado por Giese, 2019)

O comportamento teórico típico de um elemento de Concreto Têxtil, submetido a carregamento uniaxial de tração, é dividido em três estádios de deformação. Na fase inicial (estádio I), a matriz cimentícia suporta os esforços de tração sem fissurar. Quando o esforço solicitante é maior que a resistência à tração da matriz, ocorre a formação da primeira fissura e, nesse instante, o carregamento passa a ser resistido pela malha têxtil, iniciando o estágio II (GIESE, 2019; HEGGER *et al.*, 2006).

No estágio II, há um comportamento de múltipla fissuração (estádio IIa) caracterizado pela aderência entre os filamentos da malha têxtil e a matriz cimentícia, permitindo a transferência de esforços para a matriz e resultando na formação de uma nova fissura. Esse processo ocorre, sucessivamente, até que as fissuras se estabilizam e a matriz não influencia mais no comportamento estrutural do Concreto Têxtil. Neste momento, os esforços passam a ser resistidos apenas pela malha têxtil, caracterizando o estágio IIb (GIESE, 2019; HEGGER *et al.*, 2006; PELED, BENTUR, MOBASHER, 2017). Por fim, quando a malha têxtil atinge sua resistência última, ocorre a ruptura do Concreto Têxtil (estádio III), visto que as malhas têxteis são materiais frágeis, o Concreto Têxtil também apresentará uma ruptura frágil (HEGGER *et al.*, 2006).

Devido às características do Concreto Têxtil serem dependentes dos materiais utilizados (tipo de matriz, a geometria e o material do malha têxtil), o comportamento da curva tensão deformação pode apresentar algumas variações do modelo teórico apresentado na Figura 12 (GIESE, 2019; HEGGER *et al.*, 2006; HEGGER; VOSS, 2004; NORA, 2018). O comportamento idealizado na Figura 12, representa o previsto para um elemento somente de Concreto Têxtil. Entretanto, quando o Concreto Têxtil é aplicado como material de reforço, em um elemento de concreto armado, há algumas modificações devido ao comportamento simultâneo do concreto armado e o Concreto Têxtil. Giese (2019) idealizou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com Concreto Têxtil de acordo com o ilustrado na Figura 13.

No trecho I, da Figura 13, a viga encontra-se no estado elástico, no qual as tensões de tração não superaram as resistências do concreto e da matriz cimentícia do reforço. O início do trecho II ocorre quando os materiais cimentícios têm sua resistência à tração superada e surge a primeira fissura. Nesse instante, as tensões de tração passam a ser resistidas pelas armaduras e pela malha têxtil. Nesse trecho, observa-se uma tendência linear na curva, refletindo o comportamento elástico da malha têxtil e do aço, sendo o comportamento do aço o predominante no sistema, havendo pouca contribuição da armadura têxtil (GIESE, 2019).

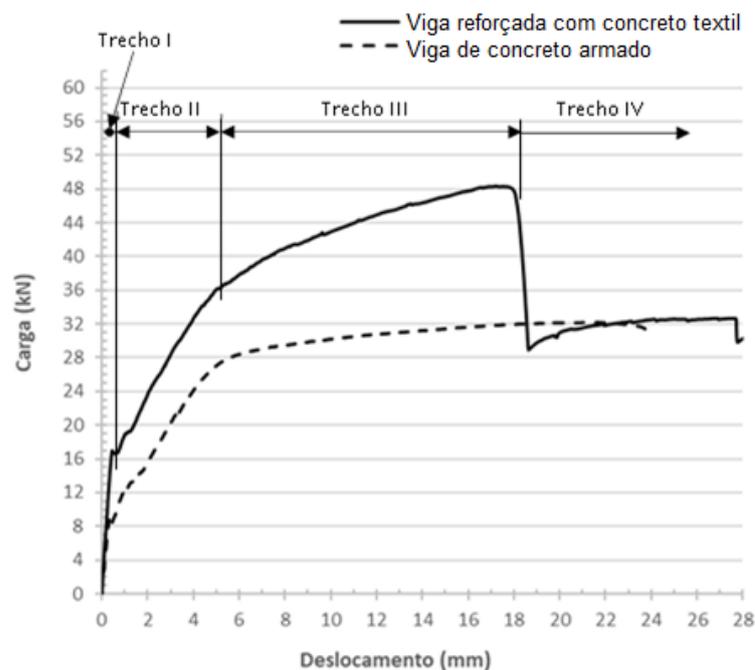


Figura 13: Curva típica obtida do ensaio de flexão a quatro pontos para as vigas de concreto armado reforçadas com Concreto Têxtil

(Fonte: adaptado Giese, 2019)

Quando o aço atinge a tensão de escoamento, é iniciado o trecho III (Figura 13). Com o aço em escoamento, o incremento da capacidade de carga da viga reforçada passa a depender, principalmente, da malha têxtil. Isto é evidenciado pela linearidade, no trecho, da curva carga x deslocamento. Quando a malha têxtil atinge a tensão de ruptura, inicia-se o trecho IV, promovendo a queda súbita da força aplicada, transferindo a tensão aplicada na seção transversal para o aço, ocorrendo posteriormente a ruptura do elemento estrutural (GIESE, 2019).

Peled, Bentur e Mobasher (2017) destacam que a eficiência do reforço com Concreto Têxtil, em estruturas de concreto armado, mostrou-se elevada, conforme demonstrado em diversos estudos. Segundo os autores, dentre uma gama de parâmetros avaliados que influenciam a sua eficiência se incluem: o número de camadas; o tipo do tecido empregado no Concreto Têxtil e a modificação da matriz cimentícia.

### 2.4.3 Aplicação do Concreto Têxtil para reforço e recuperação

A aplicação do Concreto Têxtil, como material de reforço, pode ser comparada com reforços de compósitos de fibras poliméricas, ou seja, reforços aderidos ao substrato através de uma resina. O reforço com Concreto Têxtil consiste em substituir a resina por uma matriz cimentícia e, o material polimérico, por uma malha têxtil. Desta forma, destaca-se algumas das vantagens do uso do Concreto Têxtil: maior proteção à ação de altas temperaturas, baixo custo da matriz comparado à resina, compatibilidade com superfícies úmidas, permeabilidade ao vapor e ausência de liberação de compostos perigosos (LARRINAGA P. *et al.*, 2010).

Para a aplicação do Concreto Têxtil como material de reforço, alguns parâmetros devem ser avaliados para se obter um reforço eficiente, entre eles o número de camadas de têxtil na matriz cimentícia. Schladitz *et al.* (2012) avaliaram o efeito do número de camadas, no comportamento à flexão, de lajes reforçadas com Concreto Têxtil. Verificaram um efeito significativo com o aumento do número de camadas de reforço têxtil. Giese (2019) concluiu que as cargas máximas, obtidas no ensaio de flexão em vigas reforçadas com Concreto Têxtil, apresentaram um aumento, em relação à viga testemunho, de 30,34%, quando duas camadas de têxtil, a 81,82%, com quatro camadas de têxtil.

Nora (2018), num levantamento em série de estudos em Concreto Têxtil, descreve que de forma geral, a capacidade de carga do reforço cresce com o aumento do número de camadas executadas. Entretanto, existe um limite para este aumento. Ortlepp *et al.* (2004) relatam que a

falha sempre ocorre na posição mais fraca. Portanto, a camada com a menor tensão de adesão determinará a falha do sistema. Desta forma, quanto mais camadas houver, maior será a chance de ocorrência

A falha por adesão ou aderência, geralmente, é resolvida através da ancoragem da camada de reforço do Concreto Têxtil, sendo a ancoragem um dos pontos-chaves para o desempenho do sistema de reforço. Os problemas de aderência são abordados nos trabalhos de Nora (2018) e ORTLEPP *et al.* (2004). Em relação à ancoragem do têxtil, Nora (2018) avaliou a execução da ancoragem em forma de “U” e constatou que esta não afetou o desempenho do reforço em Concreto Têxtil quanto à carga de ruptura. Giese (2019) avaliou, em um teste piloto, a influência da ancoragem e constatou que as vigas sem ancoragem tiveram comportamento superior em relação à viga com sistema de ancoragem. A autora pressupõe que a ancoragem interferiu na distribuição de esforços, ao longo da viga, e afetou o equilíbrio da seção transversal. Nesse caso, ocorreu o deslizamento do têxtil para cargas inferiores em relação às vigas sem sistema de ancoragem, indicando que há necessidade de mais estudos sobre o assunto.

Uma aplicação do Concreto Têxtil, para a recuperação de estruturas de concreto armado corroídas, foi realizada por Elghazy *et al.* (2018a) com o objetivo de avaliar o comportamento do reparo. Foram avaliadas vigas com um único grau de corrosão, ou seja, com redução de 23% na massa do aço, e dois tipos de malhas de têxteis. Uma malha de PBO (*Polyparaphenylene benzobisoxazole*), em quatro camadas, uma de carbono em três camadas. Quanto à ancoragem do têxtil, foram utilizadas duas variações: em “U” na extremidade e envoltório em “U” em todo o comprimento da viga.

Conforme Elghazy *et al.* (2018a), a corrosão reduziu em 15% a carga de ruptura. Quanto às vigas recuperadas, observou-se que, aquelas reparadas com têxtil PBO, mostraram menor rigidez pós-escoamento e maior ductilidade do que as recuperadas com têxtil de carbono. O reparo das vigas corroídas com Concreto Têxtil melhorou, em comparação a viga sem corrosão, o comportamento à flexão e aumentou sua capacidade de carga entre 14 e 65%. Em relação ao esquema de ancoragem, o envoltório em “U” foi mais eficiente do que o de ancoragem de extremidade.

Em outro estudo, publicado pelos mesmos autores, Elghazy *et al.* (2018b), estes tiveram resultados semelhantes ao anterior (ELGHAZY *et al.*, 2018a). Neste segundo estudo aqui citado, a recuperação foi realizada em vigas com grau de corrosão de 13%, expresso em perda

de massa da armadura. A variação do número de camadas de aplicação do Concreto Têxtil foi entre uma e quatro, com têxtil de carbono. Os autores concluíram que a aplicação do Concreto Têxtil para reforço aumentou a capacidade final das vigas corroídas entre 5 e 52%.

Deve ser levado em consideração que os estudos desenvolvidos por Elghazy *et al.* (2018a; 2018b) utilizaram graus de corrosão moderados, entre 13% e 23%; o número de camadas da malha têxtil foi pré-fixado; e, além disso, a corrosão não foi realizada em toda a viga, mas somente no terço médio do elemento. Entretanto, pode ser verificado que o Concreto Têxtil se apresenta como uma técnica promissora e com potencial para a recuperação de estruturas corroídas, necessitando de maiores estudos.

Portanto, deve-se considerar diferenças entre os estudos acima citados e o da presente tese, pois esse foi desenvolvido para situações de corrosão em todo o elemento estrutural e, em relação ao reforço em Concreto Têxtil, houve dimensionamento com a finalidade de recuperar a capacidade estrutural dos elementos de concreto armado corroídos.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De acordo com o problema de pesquisa, descrito no Capítulo 1, em conjunto com a revisão bibliográfica, foi realizada uma análise experimental com o objetivo de avaliar a possibilidade da aplicação do UHPFRC e do Concreto Têxtil como materiais de recuperação de elementos estruturais de concreto armado com corrosão. A finalidade principal é a recomposição da capacidade estrutural e, portanto, o programa experimental da presente tese compreende a investigação do comportamento de estruturas de concreto armado corroídas e recuperadas. Foram utilizadas, como elementos representativos das estruturas de concreto armado, vigas de seção retangular. Procurou-se, dentro das limitações experimentais, o emprego de vigas em dimensões expressivas, em proporções reais, com a finalidade de evitar efeitos relativos à escala reduzida.

Neste capítulo é detalhado o programa experimental. São descritas as variáveis de estudo, os materiais utilizados, a técnica de aceleração da corrosão, os procedimentos de recuperação das vigas corroídas e os métodos e ensaios utilizados para a realização da pesquisa.

#### 3.1 VARIÁVEIS DE PESQUISA

Em vista dos efeitos deletérios que a corrosão pode gerar nas estruturas de concreto armado, a variável de controle principal será a influência da corrosão na capacidade estrutural de vigas de concreto armado, definida pelo **grau de corrosão**. Esta definição parte do conhecimento que certos níveis de corrosão comprometem a capacidade estrutural de elementos de concreto armado, requerendo um processo de recuperação/reforço. Desta forma, adotou-se, como variável de controle, o **procedimento de recuperação**, tendo em vista a recuperação da capacidade estrutural de vigas de concreto armado sem que ocorra a necessidade da execução de reforços.

No decorrer do texto, são definidos os níveis de cada variável de controle que foram utilizadas na pesquisa, tendo como base os resultados já observados na revisão bibliográfica abordada no Capítulo 2.

### 3.1.1 Grau de corrosão

Considerando-se os estudos relativos a influência do grau de corrosão e as alterações do comportamento das barras de aço e das estruturas em concreto armado, descritos no Capítulo 2, para essa pesquisa foram adotados os graus de corrosão, em relação a perda de massa das armaduras, de **0%** (referência), **5%**, **10%** e **15%**. Com isto, tem-se o objetivo de avaliar a influência da corrosão no comportamento de vigas de concreto armado submetidas à flexão. Com a finalidade de compreender com maior acurácia os resultados laboratoriais, em relação às estruturas em escala real, foram utilizados protótipos de vigas com dimensões consideradas representativas: seção transversal de 15 cm de base, 30 cm de altura e 300 cm de comprimento. O detalhamento das vigas utilizadas está descrito no item 3.2.1.

Paralelamente a avaliação da influência da corrosão no comportamento de vigas de concreto, foi realizada a recuperação da corrosão, com o objetivo de reabilitar o desempenho estrutural das vigas corroídas. Porém a recuperação é realizada somente para os graus de corrosão de 10 e 15%. Uma exposição à cerca disso está discutida no próximo item.

### 3.1.2 Procedimento de recuperação

Os procedimentos de recuperação da corrosão em estruturas de concreto armado corroídas devem garantir a manutenção da vida útil e, para níveis elevados de grau de corrosão, assegurar o desempenho estrutural. Assim, nesta pesquisa, como já exposto anteriormente, foram propostos dois procedimentos para recuperação de estruturas de concreto armado, afetadas por corrosão com: UHPFRC e Concreto Têxtil.

As duas técnicas de recuperação apresentam-se como promissoras, pois alcançam elevados parâmetros de durabilidade e, ao mesmo tempo, possuem características mecânicas elevadas, como verificado em outros estudos. Devido a essas características, o procedimento de recuperação, além de tratar a corrosão, realizará o reforço dos elementos corroídos. Portanto, tem-se como variável de controle o tipo de recuperação, sendo realizado com **UHPFRC** e **Concreto Têxtil**.

Os procedimentos de recuperação foram realizados somente para os graus de corrosão de 10% e 15%, visto argumentações de Helene (1986), Cascudo (1999) e Ribeiro (2018), nas quais, para valores inferiores a 10%, é indicado apenas o processo de tratamento da corrosão. Desta

forma, para o grau de corrosão de 5% foi avaliada somente a influência em relação ao comportamento estrutural de vigas de concreto armado.

Tendo em vista que os procedimentos de recuperação atuarão como reforço nas vigas de concreto armado, no item 3.7 está apresentada uma verificação analítica da estimativa da espessura de recuperação com UHPFRC e a quantidade de camadas necessárias da malha do Concreto Têxtil. Esse procedimento se fez necessário, visando ao aprimoramento das técnicas de recuperação em função dos diferentes graus de corrosão estudados.

## 3.2 DETALHAMENTO DAS VIGAS E DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE RECUPERAÇÃO

Nesse item, é detalhado o projeto estrutural das vigas de concreto armado, incluindo os materiais e propriedades do concreto e o detalhamento das armaduras. Em seguida, são descritas as características dos materiais de recuperação: UHPFRC e Concreto Têxtil. Sobre a moldagem das vigas, cabe ressaltar que foi realizada em uma indústria de pré-moldados de concreto armado. Isto é detalhado no item 3.5 deste programa experimental.

### 3.2.1 Projeto Estrutural das Vigas de Concreto Armado

Com o intuito de aproximar a situação estudada a uma usual em obras urbanas e em ambientes litorâneos, optou-se pela utilização de um concreto com resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa, ou seja, o mínimo tolerado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para a Classe de Agressividade Ambiental III (CAAIII). A escolha ocorre pela constatação de que, concretos com a resistência entre 20 e 30 MPa, são utilizados nas estruturas de edifícios de maneira geral. Além disto, concretos, com resistência à compressão superiores, são menos propensos à corrosão de armadura. Tal fato deve-se à baixa porosidade na qual os transportes de oxigênio e de umidade são dificultados e, como consequência, são reduzidas a passagem da corrente elétrica e a corrosão acelerada (GRAEFF, 2007; CAETANO, 2008; STEIN, 2019).

Nos itens seguintes, são apresentadas as dimensões e detalhamento das armaduras das vigas de concreto armado (item 3.2.1.1), os materiais utilizados para a dosagem do concreto (item 3.2.1.3) e, por fim, as características e propriedades deste concreto (item 3.2.1.1).

### 3.2.1.1 Dimensões e detalhamento das vigas

O número de vigas e o dimensionamento foram definidos, atendendo a uma série de restrições, mas levando em consideração a representatividade dos protótipos frente a estruturas em escala real. O número de vigas foi determinado com base na revisão da literatura e nos objetivos, sendo estes, inicialmente, elaborados para um estudo mais amplo relativo aos efeitos da corrosão. Este estudo mais amplo, prevê a avaliação da corrosão sob carregamentos estáticos, objetivo desta tese, e, os efeitos da corrosão em condições de carregamentos cíclicos, objetivo de futuras pesquisas. Para este programa experimental como um todo, foram concretadas cinquenta vigas: dezesseis utilizadas nessa pesquisa e 34 destinadas à avaliação dos efeitos de fadiga.

Quanto à sua geometria, importantes aspectos condicionaram às dimensões. Primeiramente, a preocupação com a utilização de uma seção representativa de elementos estruturais usuais nas edificações, possibilitando avaliar os efeitos da corrosão, sem que as dimensões interferissem no processo corrosivo, conforme efeito de escala relatado por Ahn e Reddy (2001). Além disso, há uma limitação de massa, uma vez que as vigas precisavam ser movimentadas durante o processo de pesquisa. Adicionalmente, há uma limitação quanto ao comprimento da viga, a fim de possibilitar o seu rompimento na prensa universal de ensaios disponível no LEME.

A definição das armaduras, por sua vez, depende do tipo do esforço que é aplicado. No caso das vigas submetidas à flexão, a taxa de armadura longitudinal deve ser reduzida, para que seja possível avaliar o desempenho das diferentes recuperações sob o efeito da flexão. Entretanto, a armadura transversal, deve ser superestimada para garantir que o modo de ruptura por cisalhamento ocorra por esmagamento da biela, para uma carga bastante elevada, e não por escoamento dos estribos.

Portanto, todas as 50 vigas moldadas, inclusive as vigas utilizadas para a avaliação dos efeitos da corrosão e posterior recuperação, especialmente moldadas para os objetivos desta tese, possuem seção transversal de 15 cm (base) x 30 cm (altura) e comprimento de 300 cm. A armadura longitudinal inferior é composta por duas barras de aço CA-50, com 12,5 mm de diâmetro ancoradas com ganchos na extremidade, correspondendo a uma taxa de armadura de  $\rho = 0,55\%$ . A armadura superior, é composta, igualmente por aço CA-50, com 6,3 mm de diâmetro. A armadura transversal é de estribos com diâmetro de 6,3 mm e espaçamento uniforme de 7 cm. A armadura possui um cobrimento de 1,5 cm. Na Figura 14, é apresentado o detalhamento das vigas de concreto armado.

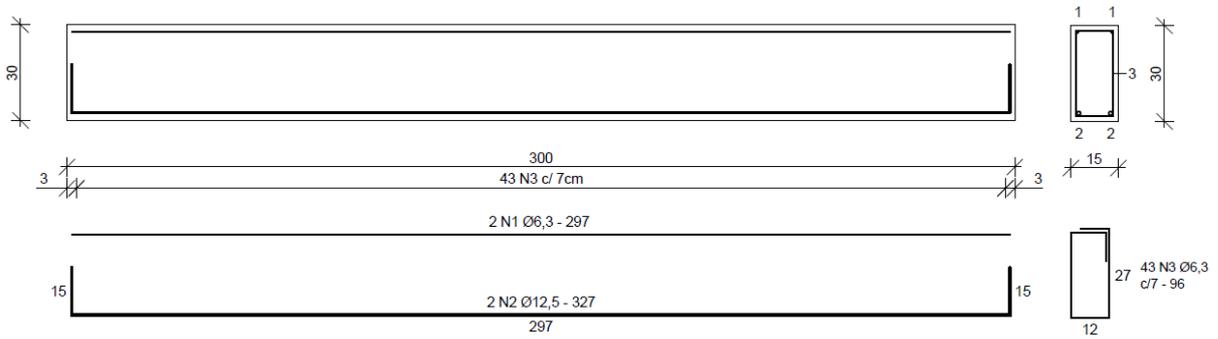


Figura 14: Detalhamento da armadura das vigas de concreto armado

### 3.2.1.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela empresa responsável pela produção das vigas de concreto armado. Foram empregados: cimento Portland CPV-ARI, areia natural, fina e média, brita basáltica tipos 1 e 0 e aditivo superplastificante.

O cimento utilizado, para a produção das vigas de concreto armado, foi o Portland de alta resistência inicial, classificado como CPV-ARI. Optou-se por esse tipo de cimento, por apresentar menos adições em sua composição, sendo formado por 95 a 100% de clínquer/gesso e 0 a 5% de calcário ou cinza volante. Essas características levam a não ocorrência de efeitos secundários no processo de aceleração de corrosão, por íons cloreto, em relação à presença adições pozolânicas. Os ensaios químicos do cimento, de acordo com as informações do fabricante em relação ao lote utilizado, podem ser visualizadas no Quadro 1, enquanto, a caracterização física, está no Quadro 2.

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,73	≤ 1,0
Perda ao Fogo – PF	ABNT NM 18/12	%	3,92	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 21/12	%	3,68	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	ABNT NM 16/12	%	3,10	≤ 4,5
Cal Livre - CaO	ABNT NM 20/12	%	1,03	≤ 3,0

Quadro 1: Caracterização química do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	5.509	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,09	não aplicável
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579/91	%	0,06	≤ 6,0
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	187	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	233	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/91	mm	0,50	≤ 5,0
Resistência à compressão 1 dia	ABNT NBR 16697/18	MPa	25	≥ 14
Resistência à compressão 7 dias	ABNT NBR 16697/18	MPa	46,4	≥ 24
Resistência à compressão 28 dias	ABNT NBR 16697/18	MPa	55,1	≥ 34

Quadro 2: Caracterização física do cimento

Quanto aos agregados miúdos, foram utilizados dois tipos, ambos de origem natural, designados areias fina e média. As características físicas e granulométricas dos agregados miúdos estão expostas no Quadro 3, com o respectivo método de ensaio normatizado, incluindo as composições granulométricas.

Característica		Método de ensaio	Areia natural fina	Areia natural média
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64	2,63
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0,30	2,36
Módulo de Finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0,69	1,80
Abertura da Peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida acumulada (%)	
Distribuição granulométrica	4,75		0	0
	2,38		0	1
	1,18		0	6
	0,60		2	16
	0,30		67	61
	0,15		100	100

Quadro 3: Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos

Foram utilizados dois tipos de agregados graúdos, ambos britados de origem basáltica. Os agregados graúdos foram classificados, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), em brita, tipo 0 e tipo 1. As características físicas dos agregados graúdos estão expostas no Quadro 4, com o respectivo método de ensaio normatizado, bem como as composições granulométricas.

Característica		Método de ensaio	Brita 0	Brita 1
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,94	2,92
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	12,5	19,0
Módulo de Finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	6,29	7,03
Abertura da Peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida acumulada (%)	
Distribuição granulométrica	25		0	0
	19		0	0
	12,5		0	30
	9,5		30	88
	6,3		58	99
	4,75		11	100
2,36	1	100		

Quadro 4: Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos

Com o intuito de controlar e de melhorar a plasticidade do concreto, foi utilizado aditivo redutor de água tipo 2, conforme NBR 11768-1 (ABNT, 2019). A água utilizada para dosagem foi proveniente da rede municipal de abastecimento de água do município de Porto Alegre – RS.

### 3.2.1.3 Propriedades do concreto

A concretagem das vigas foi executada por uma fábrica de pré-moldados, localizada em Porto Alegre – RS. Foi utilizada uma central de concreto computadorizada com dosagem em massa. No total, como já mencionado, foram concretadas cinquenta vigas de concreto armado. Devido a limitação da linha de produção, a concretagem foi dividida em seis lotes com, no máximo, nove vigas por lote.

Todas as vigas, de cada lote, foram moldadas com concreto em uma única dosagem e, para todos os lotes, foi utilizado a mesma composição do traço de concreto. Os dados da composição do traço de concreto utilizado estão apresentados no Quadro 5.

Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia Fina (kg/m <sup>3</sup> )	Areia Média (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (l/m <sup>3</sup> )	Relação A/C
271	280	654	231	692	185	0,8	0,68

Quadro 5: Descrição do traço utilizados na execução das vigas de concreto armado

### 3.2.2 UHPFRC

Um dos princípios do UHPFRC é a produção de um material com o mínimo de defeitos, utilizando, para isso, partículas sólidas de diâmetros pequenos, na faixa de 0,5 µm a 2 mm, que proporcionam, assim, uma mistura de alta densidade e com o mínimo possível de vazios (RICHARD; CHEYREZY, 1995). Para atingir esse objetivo, é fundamental, para a produção do UHPFRC, o estudo dos materiais, juntamente com as proporções destes. Logo, a análise da distribuição dos tamanhos das partículas, que compõem o material, tem se mostrado um procedimento eficiente no desenvolvimento e produção destes novos materiais, principalmente sendo o objetivo a elaboração de compostos com alta densidade (VANDERLEI,2004).

Tendo em consideração que o objetivo desta pesquisa é a aplicação do UHPFRC na recuperação de estruturas de concreto armado corroídas, não foi foco do estudo uma definição específica dos materiais e da sua dosagem. Foi empregada adaptação de proporções de materiais usados em outras pesquisas desenvolvidas, ao longo dos anos, pelo Grupo de Pesquisa do LEME.

O cimento definido foi o Portland de alta resistência inicial, classificado como CPV-ARI para a produção do UHPFRC. Optou-se por esse tipo de cimento por apresentar menos adições em sua composição, formado por 95 a 100% de clínquer/gesso e 0 a 5% de calcário ou cinza volante. Desta forma haverá mais disponibilidade de hidróxido de cálcio para as adições pozolânicas (NBR 5733 ABNT, 1991; NBR 5737 ABNT, 1992). Os ensaios químicos para o cimento utilizado, de acordo com informações do fabricante em relação ao lote utilizado, podem ser visualizados no Quadro 6, enquanto a caracterização física está apresentada no Quadro 7.

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,59	≤ 1,0
Perda ao Fogo – PF	ABNT NM 18/12	%	2,70	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 21/12	%	1,98	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	ABNT NM 16/12	%	2,15	≤ 4,5
Cal Livre - CaO	ABNT NM 20/12	%	2,08	≤ 3,0

Quadro 6: Caracterização química do cimento usado no UHPFRC

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	4.998	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,10	não aplicável
Resíduo na peneira #200 ABNT NBR	ABNT NBR 11579/91	%	0,07	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,59	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	157	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	193	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/91	mm	0,10	≤ 5,0
Resistência à compressão 1 dia	ABNT NBR 16697/18	MPa	22	≥ 14
Resistência à compressão 7 dias	ABNT NBR 16697/18	MPa	47,2	≥ 24
Resistência à compressão 28 dias	ABNT NBR 16697/18	MPa	55,9	≥ 34

Quadro 7: Caracterização física do cimento usado no UHPFRC

Para a produção do UHPFRC, foi utilizada sílica ativa com adição pozolânica. O material possui massa específica de 2,20 g/cm<sup>3</sup>, conforme informações do fabricante, e as demais características físicas e químicas estão demonstradas no Quadro 8.

Característica	Resultado
Massa específica	2,22 g/cm <sup>3</sup>
Teor de SiO <sub>2</sub>	> 90%
Superfície específica (B.E.T.)	~19.000 cm <sup>2</sup> /g
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm

Quadro 8: Características físicas e químicas da sílica ativa

Quanto aos agregados, foram empregadas três classes de distribuições granulométricas distintas. Utilizou-se duas areias naturais de diferentes granulometrias, ambas de formação

quartzosa com propriedades apresentadas no Quadro 9. Para a terceira classe, foi utilizado filler de pó de quartzo. Segundo o fabricante, as partículas deste material possuem um diâmetro médio de 11,52  $\mu\text{m}$ . Para a determinação da sua massa específica, foi adotado o método recomendado pela NBR 16605 (ABNT, 2017), obtendo o valor de 2,66  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Característica	Método de ensaio	Areia natural 1	Areia natural 2
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,49	2,54
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0,60	0,30
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0,49	0,21

Quadro 9: Características físicas e granulométricas das areias naturais

Foram utilizadas fibras metálicas retas, banhadas em bronze, com comprimento de 13 mm e diâmetro de 0,21 mm, tendo, portanto, um fator de forma igual a 62. Quanto as características mecânicas, as fibras possuem resistência à tração de 2750 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa.

Com objetivo de se obter um material autonivelante, foram utilizados dois aditivos químicos. O primeiro é o redutor de água tipo 2, conforme NBR 11768-1 (ABNT, 2019), à base policarboxilato modificado com teor de sólidos de 49%. O segundo, é um modificador de viscosidade antissegregante, à base de poliésteres hidrossolúveis, ou seja, um aditivo que reduz a segregação de concretos fluidos, utilizado para evitar a segregação após a adição das fibras metálicas. Para avaliar a fluidez do material no estado fresco, buscando determinar parâmetros relativos à trabalhabilidade do material, foi aplicado o ensaio de índice de consistência, de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2002). Apesar de se tratar de um ensaio próprio para determinação da trabalhabilidade de argamassas, ele serviu como parâmetro de medição para o UHPFRC. Entretanto, não foram aplicados os golpes, para o adensamento, previstos na metodologia de ensaio, mas avaliando somente o espalhamento devido a capacidade de autonivelamento do material.

A água utilizada para dosagem foi proveniente da rede municipal de abastecimento de água do município de Porto Alegre – RS. Para mitigar os efeitos das retrações, devido ao elevado calor de hidratação do UHPFRC, foi utilizada água resfriada a temperatura de aproximada de 5 °C.

Um estudo de dosagem, a fim de alcançar uma resistência à compressão de 140 MPa, foi desenvolvido. Considerou-se no estudo, o método do empacotamento de partículas, segundo as

recomendações apresentados por Reginato (2011), e as demais considerações e ajustes foram baseados no trabalho publicado por Reginato *et al.* (2013). Foi definido, assim, o traço de UHPFRC apresentado no Quadro 10. Outra características dos UHPFRC é a elevada resistência à tração, relacionada diretamente com as fibras adicionadas ao material. Estudos aprofundados, relativos aos tipos de fibras e seus teores foram apresentadas por Fávero (2016), Christ (2019), Agüero (2019) e Reginato *et al.* (2013). Seguindo as recomendações destes autores, foi adotada fibra metálica, já especificada, com teor de 2,5% em relação ao volume do concreto, conforme apresentado no Quadro 10.

Material	Traço unitário	Consumo m <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento Portland CP-V	1	815,6
Sílica Ativa	0,205	167,2
Pó de Quartzo	0,475	318,1
Água/aglomerante	0,21	193,9
Areia 1	0,750	387,4
Areia 2	0,390	611,7
Aditivo Superplastificante	2,5%	24,57
Aditivo modificador de viscosidade	1,0%	9,83
Fibra metálica 0,21 mm	2,5%	195,1

Quadro 10: Descrição do traço do UHPFRC utilizados na recuperação das vigas de concreto armado corroídas

Para a produção do UHPFRC, foi utilizada uma betoneira de eixo vertical, visto a necessidade de imprimir uma maior energia à mistura dos materiais, já que quantidade de água na mistura é reduzida. A ordem de mistura dos materiais é determinante para garantir a boa qualidade do UHPFRC. De acordo com Fávero (2016), existem vários trabalhos que indicam uma série de recomendações para a ordem de misturas dos materiais. Reginato (2011) destaca que procedimentos de misturas não adequados podem gerar aglomerações de partículas de sílica ativa. Assim, a ordem de mistura dos materiais seguiu as recomendações de Reginato (2011) e Fávero (2016). O procedimento de mistura é baseado na metodologia utilizada pela FHWA (2006) e pode ser consultado nos referidos trabalhos.

### 3.2.3 Concreto Têxtil

A aplicação do Concreto Têxtil envolve uma ou mais camadas alternadas da matriz cimentícia e têxteis. Em síntese, são estes os principais materiais constituintes do Concreto Têxtil (KÖCKRITZ *et al.*, 2006). À vista disso, nos itens abaixo são apresentadas as definições referentes a matriz cimentícia e a malha têxtil utilizadas nesse estudo.

### 3.2.3.1 Matriz Cimentícia

As matrizes utilizadas para o Concreto Têxtil devem atender demandas específicas em relação ao processo de produção e propriedades mecânicas do compósito e durabilidade do material de reforço. Na maioria dos casos, há necessidade de uso de agregados com diâmetro máximo reduzido (<2 mm) e, portanto, esses sistemas de matriz podem ser considerados como argamassa (ALDEA; T. GRIES, 2006).

O estudo da matriz não está no escopo desta pesquisa. Considerou-se que os pré-requisitos básicos para a escolha da matriz cimentícia são: utilização de argamassa com desempenho adequado à necessidade da aplicação do Concreto Têxtil e com potencial para a recuperação de estruturas de concreto armado. Conforme Giese (2019), um problema usual, nos reforços com aplicação de Concreto Têxtil, é a aderência da argamassa ao substrato. Dessa forma, uma das características necessárias é uma boa resistência de aderência.

Outro fator a considerar na escolha da argamassa é a sua trabalhabilidade. Embora o procedimento de recuperação, realizado nesse estudo experimental, tenha sido com a viga na posição invertida, facilitando a execução da recuperação, isso não ocorre nas condições reais de execução. Portanto, a reologia da argamassa passa a ser o fator limitante e, em função disto, optou-se por argamassa com características tixotrópicas, garantindo a executabilidade em uma situação *de in loco*. Uma vez que essa argamassa é aplicada na recuperação de estruturas de concreto armado corroídas, tendo-se, assim, um processo de corrosão instaurado, a escolha recaiu em uma argamassa com inibidor de corrosão em sua composição. Quanto ao desempenho estrutural, levou-se em consideração as propriedades mecânicas da argamassa, de modo a serem compatíveis com o concreto, principalmente em relação aos módulos de elasticidades da argamassa e do concreto.

Na linha de pesquisa de Concreto Têxtil do LEME, Giese (2019) realizou um estudo que avaliou três diferentes argamassas para a aplicação do Concreto Têxtil como reforço em estruturas de concreto armado. Desta forma, levando em consideração as características descritas acima e os resultados apresentados por Giese (2019), foi selecionada uma argamassa que apresenta características adequadas para execução este tipo de aplicação, considerando que, no caso deste estudo, a estrutura se apresenta corroída. Foi utilizada uma argamassa polimérica para reparos estruturais, com agente adesivo integrado, classificada como R4 na norma europeia EN 1504. Conforme indicação do fabricante, o diâmetro máximo do agregado é de 2,0 mm e possui, aos 28 dias, as seguintes propriedades: resistências de aderência maior do que 2,0 MPa, à

compressão maior do que 70 MPa e à tração na flexão maior do que 9 MPa e, ainda, módulo de elasticidade à compressão de 31 GPa.

### 3.2.3.2 Malha Têxtil

Uma extensa pesquisa foi realizada com malhas têxteis buscando verificar a presença de características específicas que possibilitassem a execução de reforço em Concreto Têxtil. Foram levadas em consideração propriedades como: abertura da malha, resistências a álcalis e à tração, e módulo de elasticidade. Em especial, foi definido como requisito principal a disponibilidade nacional, visto a possibilidade de aplicações futuras da técnica de recuperação.

Pesquisas e resultados obtidos pelo Grupo de Pesquisa do LEME, com diferentes malhas para aplicação no Concreto Têxtil, foram examinados. Analisando os resultados obtidos por Denardi (2016), Nora (2018) e Giese (2019), em conjunto com características técnicas das malhas têxteis disponíveis no Brasil, foi definido para aplicação nesta pesquisa a malha têxtil ARMO-mesh L500 (Figura 15), produzida pela empresa S&P. Trata-se de uma malha têxtil composta por fibra de carbono na direção principal e por fibra de vidro no sentido transversal. As propriedades e características técnicas da malha empregada estão apresentadas no Quadro 11.



Figura 15: Malha têxtil ARMO-mesh L500

Parâmetro	Valor
Abertura da malha (mm x mm)	30 x15
Módulo elasticidade (GPa)	240
Resistência à tração da fibra (MPa)	4300
Gramatura da fibra na direção principal (g/m <sup>2</sup> )	200
Densidade da fibra (g/cm <sup>3</sup> )	1,7
Alongamento de ruptura (%)	0,5
Espessura teórica de cálculo (mm)	0,177
Tensão de tração (MPa)	1200

Quadro 11: Dados da malha têxtil ARMO-mesh L500

Optou-se por não realizar nenhum tipo de ancoragem da malha têxtil, devido as observações dos trabalhos de Nora (2018), em que a ancoragem não interferiu no desempenho do Concreto Têxtil, e de Giese (2019), em que a ancoragem reduziu a capacidade de carga do teste piloto realizado.

### 3.3 ESTRUTURA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste item, apresenta-se o programa experimental desta pesquisa, que, como já salientado, avalia o efeito da corrosão em vigas de concreto armado, empregando duas técnicas de recuperação. Após o detalhamento das propriedades e da definição estrutural das vigas de concreto armado e dos materiais utilizados na recuperação das vigas, após o processo corrosivo, são detalhadas as etapas do trabalho.

O programa experimental divide-se em três etapas: moldagem, aceleração da corrosão e recuperação da corrosão das vigas de concreto armado. O estudo foi estruturado sob a análise comparativa, do efeito da corrosão e da recuperação da corrosão, em relação à elementos íntegros, ou seja, que não sofreram efeitos deletérios da corrosão.

Para a avaliação dos efeitos da corrosão, foram definidas duas estratégias. A primeira avaliou a corrosão através de ensaios não destrutivos, visando obtenção de dados para a detecção da corrosão em estruturas com diferentes técnicas de análise. A segunda, buscou avaliar os efeitos da corrosão sobre o comportamento estrutural de vigas de concreto armado, utilizando para isso o ensaio de flexão à quatro pontos. Quanto à avaliação da recuperação das vigas corroídas, foi realizada uma análise através da comparação do desempenho estrutural das vigas recuperadas, em relação às vigas corroídas a vigas testemunhos (sem processo corrosivo). O detalhamento

do programa experimental está representado na Figura 16, relacionando, entre si, as diferentes etapas desenvolvidas no estudo

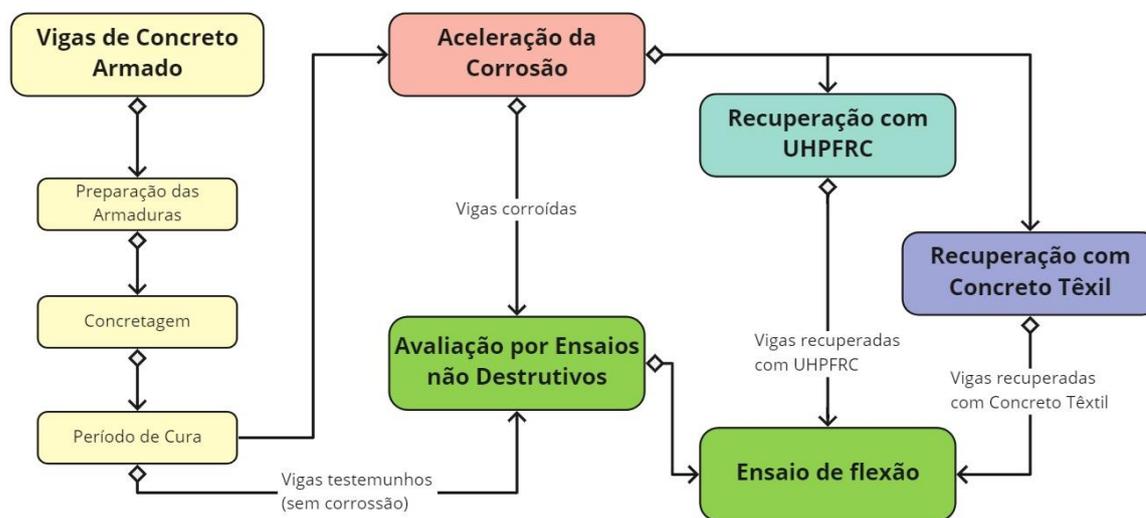


Figura 16: Detalhamento do programa experimental

O programa experimental é posto em prática com a preparação das armaduras para aceleração da corrosão, empregando o método CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada). A descrição da técnica de aceleração está apresentada no item 3.4. Em seguida foi realizada a concretagem das vigas (item 3.5). Respeitado o período de cura e o tempo de aceleração da corrosão, aplicou-se as técnicas para avaliação da corrosão através de ensaios não destrutivos (item 3.6).

Posteriormente, foi desenvolvida verificação analítica da estimativa de ruptura das vigas de concreto armado (item 3.7), considerando os efeitos da corrosão para pré-dimensionar os reforços (UHPFRC e Concreto Têxtil) empregados na recuperação das vigas corroídas. Determinadas a espessura da camada de UHPFRC e das camadas de têxteis pela abordagem analítica, foi realizada a execução dos procedimentos de recuperação (item 3.8). Após o tempo de cura, necessário para cada um dos métodos de recuperação, avaliou-se o comportamento estrutural em análise experimental. As definições, procedimentos, layout experimental e instrumentação estão descritas no item 3.9. E, por fim, foi determinado o grau de corrosão real das armaduras (item 3.10), a fim de comparar com os valores teóricos de corrosão.

Estabelecendo uma relação com as etapas do desenvolvimento do estudo experimental, é apresentada no Quadro 12 a nomenclatura das vigas utilizadas ao longo do seu desenvolvimento. Destaca-se que para cada combinação foram utilizadas duas vigas.

Grau de corrosão	Procedimento de recuperação	Nomenclatura*
0% (Referência)	Controle	COR-0-V1
		COR-0-V2
5%		COR-5-V1
		COR-5-V2
10%	Controle	COR-10-V1
		COR-10-V2
	UHPFRC	COR-10-UHPFRC-V1
		COR-10-UHPFRC-V2
TÊXTIL	COR-10-UHPFRC-V1	
	COR-10-UHPFRC-V2	
15%	Controle	COR-15-V1
		COR-15-V2
	UHPFRC	COR-15-TÊXTIL-V1
		COR-15-TÊXTIL-V2
	TÊXTIL	COR-15-TÊXTIL-V1
		COR-15-TÊXTIL-V2

\* V1 e V2 referem-se as amostras 1 e 2 para cada combinação

Quadro 12: Cominações de avaliação e nomenclatura das vigas

### 3.4 CORROSÃO ACELERADA

Devido às limitações de tempo para a realização dos experimentos em laboratório e, ao caráter lento do processo de corrosão natural das estruturas, foi necessário adotar um processo de aceleração da corrosão que permitisse gerar percentuais de perdas de massa elevados (até 15%), em um curto intervalo de tempo. Vários centros de pesquisa vêm estudando o fenômeno de corrosão de armaduras de concreto armado e os procedimentos para a sua aceleração. Devido à ausência de procedimentos padronizados e normatizados, há vários processos de aceleração da corrosão relatados em publicações. Além disso, há uma enorme variação e adaptação nos procedimentos adotados para realização dos ensaios.

Decidiu-se adotar o método de aceleração que tem sido utilizado no Grupo de Pesquisa do LEME, considerando-se o conhecimento acumulado e a infraestrutura disponível, o que facilitou seu emprego no presente estudo. O método de aceleração da corrosão adotado, como mencionado, foi o ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada). O ensaio CAIM foi concebido por Lima (1990), baseando-se nos estudos de Varela e Espinosa (1988). O método já foi empregado, com sucesso, por vários pesquisadores no LEME (ADAMATTI,

2016; CAETANO, 2008; GRAEFF, 2007; JADOVSKI, 1992; KIRCHHEIM, 2005; MARCHESAN et al., 1997; SELISTRE et al., 1993, 1994; STEIN, 2019; TORRES, 2006).

O método caracteriza-se pelo estímulo à corrosão através de indução eletroquímica, por meio da aplicação de uma diferença de potencial (ddp) ou de uma corrente elétrica (i), em um ambiente rico em cloretos. Em relação à indução eletroquímica, decidiu-se pela adoção de um estímulo através de corrente constante, baseando-se nos estudos de Graeff (2007) e na discussão abordada por Caetano (2008).

Um dos principais parâmetros que influencia no método é a densidade de corrente aplicada para aceleração da corrosão. Referente a isto, El Maaddawy e Soudki (2003) relatam que existem faixas de corrente mais apropriadas para acelerar a corrosão nas armaduras de concreto armado. Segundo Graeff (2007), valores altos de densidade de corrente de corrosão (acima de  $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) tendem a distorcer o mecanismo efetivo da corrosão. Segundo os autores, quando a densidade é muito elevada, os produtos de corrosão não dispõem de tempo suficiente para se alojarem nos poros do concreto, havendo um incremento de tensões que provoca níveis de fissuração que não correspondem à real situação que ocorre, naturalmente, nas estruturas.

Na utilização do CAIM, ocorre a incorporação de cloretos na água de imersão. Graeff (2007), Caetano (2008), Adamatti (2016) e Stein (2019) utilizaram o cloreto na água de imersão, através da dissolução de cloreto de sódio em um teor (35 g/l), produzindo uma solução salina com concentração de cloretos similar à encontrada no oceano atlântico que banha o litoral brasileiro. Sendo um método em que há a imersão do elemento de concreto armado na solução de cloreto de sódio, a profundidade de imersão também exerce um papel fundamental na corrosão acelerada. Caso, a barra de armadura, encontra-se totalmente submersa, não haverá oxigênio disponível para alimentar o processo corrosivo, e, se não houver umidade, não haverá formação do eletrólito para o processo corrosivo.

A fim de possibilitar a presença de oxigênio e de umidade, para que se desenvolva o processo corrosivo, a viga de concreto armado é submersa até a face inferior da armadura longitudinal, conforme representado na Figura 17. Foram utilizados, na solução, um eletrodo (negativo) e um positivo, ambos de fio de cobre rígido de com 2,5 mm de diâmetro. O eletrodo positivo foi posicionado 3 mm acima da armadura longitudinal. Foi utilizada borracha butílica, em perfil “U”, envolvendo o eletrodo, evitando o contato com a armadura, como pode ser observado na Figura 17.

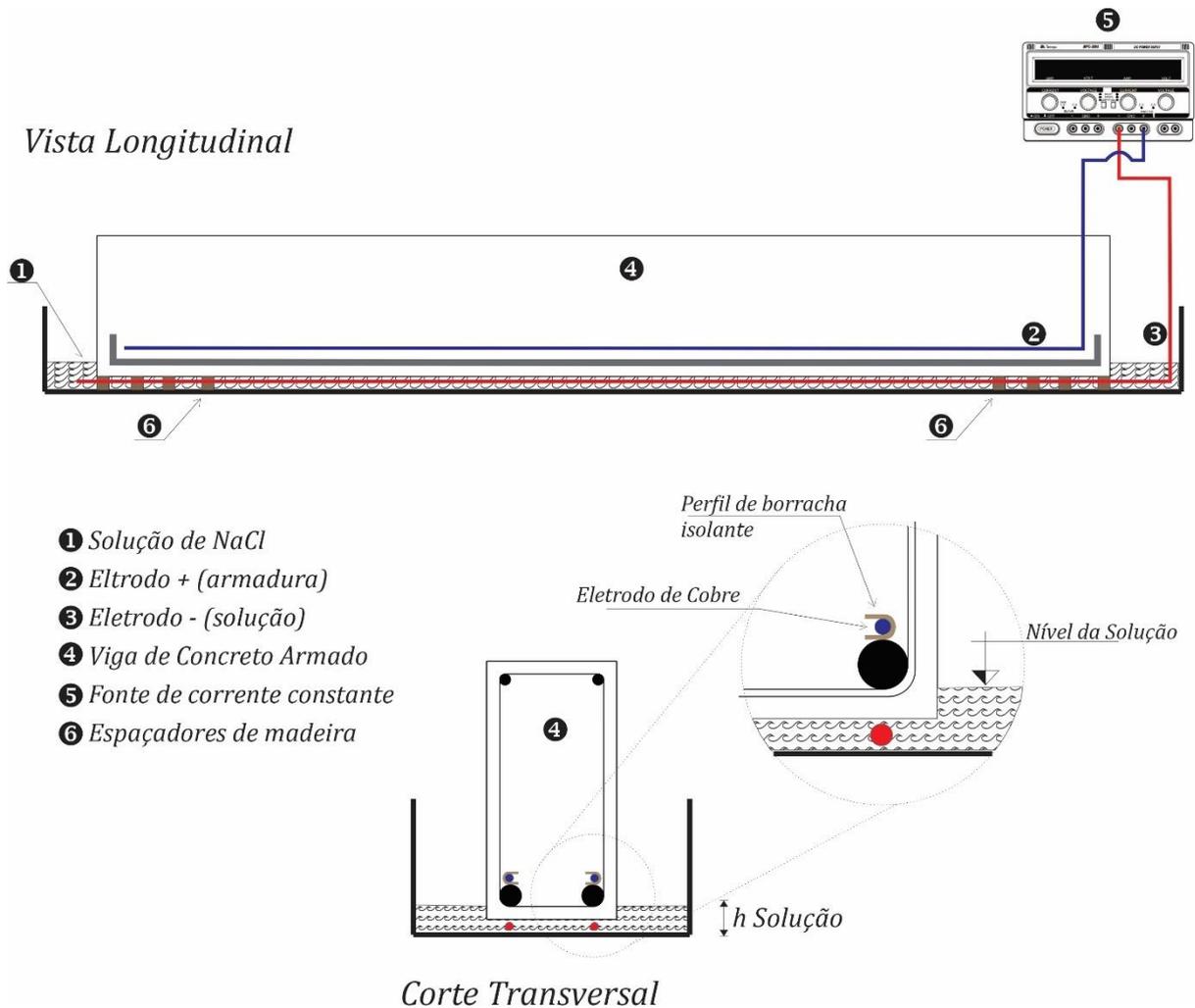


Figura 17: Layout adotado para o aceleração da corrosão

Visto que a taxa de corrente é proporcional à área da armadura (área superficial) que é corroída, considerou-se para isso as armaduras longitudinais e uma parcela das transversais. A armadura longitudinal foi considerada na totalidade do seu comprimento (297 cm), acrescentando-se 2,5 cm de comprimento para cada gancho de ancoragem. Valor esse equivalente a duas vezes o diâmetro da armadura. A armadura transversal foi considerada em duas parcelas. Uma abaixo da armadura longitudinal e outra equivalente a uma altura de 2,5 cm acima da armadura longitudinal. Valor esse também equivalente a duas vezes o diâmetro da armadura longitudinal.

Por fim, a armadura a ser corroída possuía um massa de 7.800 g e uma área superficial, submetida ao processo corrosivo, de 3878 cm<sup>2</sup>, considerando a armadura longitudinal e a parcela da armadura transversal. Tendo a taxa de corrente de 500 μA/cm<sup>2</sup>, para cada viga foi aplicada uma corrente de 1,94 A com o uso de fontes de alimentação. Cada uma delas apresenta duas saídas, capazes de fornecer corrente ou tensão constante, nas faixas de 0 a 3 A, para a

corrente, e 0 a 30 V para a tensão. Na Figura 18 está apresentado o layout adotado para a aceleração da corrosão e pode-se observar que o procedimento foi realizado em quatro vigas simultaneamente.



Figura 18: Execução da aceleração da corrosão nas vigas de concreto armado

Devido às dimensões das vigas e das piscinas utilizadas para a aceleração da corrosão, há uma área exposta considerável da solução. Desta forma, foram desenvolvidos dispositivos reguladores do nível da solução, mantendo-o constante ao longo do processo de aceleração. O volume de solução evaporado e absorvido pela viga era compensando. Estes dispositivos podem ser visualizados na Figura 18.

Para obter os graus de corrosão pretendidos, é utilizada a teoria baseada na Lei de Faraday para prever a perda de massa e, conseqüentemente, o grau de corrosão. Esta teoria já havia sido empregada por autores como Helene (1993), Graeff (2007), Caetano (2008), Adamatti (2016) e Stein (2019). O grau de corrosão, previsto pela referida Lei, corresponde à área sob a curva da corrente em função do tempo. Para os casos em que a corrosão acelerada é feita pela aplicação de corrente constante, essa área pode ser aproximada por um retângulo. Desta forma o grau de corrosão é obtido pela perda de massa que é determinada pela Lei de Faraday conforme a Equação 1:

Equação 1

$$\Delta m = \frac{M \times I \times t}{z \times F}$$

Onde,

$\Delta m$	= massa de aço consumida (g)
M	= peso atômico do metal (56 Fe)
I	= corrente aplicada (A)
t	= tempo de aceleração da corrosão (s)
z	= carga iônica (= 2)
F	= constante de Faraday (=96500A/s)

Conforme descrito por Graeff (2007), Caetano (2008), Adamatti (2014) e Stein (2019), são necessários tempos maiores de ensaio, em relação aos previstos com a simples aplicação da Lei de Faraday, para alcançar os graus de corrosão desejados. Em vista disso, é aplicada a metodologia proposta por Graeff (2007), para a calibração dos graus de corrosão, e são utilizados os valores apresentados por Stein (2019). Assim é determinado, pela Equação 2, o tempo previsto para a corrosão, de acordo com a perda de massa necessária para atingir o grau de corrosão pretendido:

Equação 2

$$t_c = \left[ \left( \frac{\Delta m \cdot z \cdot F}{M \cdot I} \right) 1,1778 \right] + 357825$$

Onde,

$t_c$  = tempo de corrosão (s)

No total, foram corroídas quatorze vigas para os graus de corrosão de 5%, 10% e 15%. A duração da aceleração da corrosão foi de aproximadamente 12, 24 e 36 dias, respectivamente, aos graus de corrosão.

Antes da concretagem, foram posicionados os eletrodos utilizados para acelerar o processo corrosivo. A empresa que realizou a concretagem entregou as armaduras montadas no LEME, onde foi executada toda a etapa de preparação para a corrosão acelerada. Após essa etapa, as armaduras foram enviadas à empresa para concretagem.

Nos eletrodos, foi utilizado fio de cobre rígido com 2,5 mm de diâmetro. O posicionamento foi realizado evitando o contato entre o eletrodo e a armadura (Figura 19), forçando a migração do cloreto de sódio por toda a armadura. O eletrodo foi posicionado 3 mm acima da armadura longitudinal e para o posicionamento foi utilizada borracha butílica, em perfil “U”, envolvendo o eletrodo, evitando seu contato com a armadura. O perfil de borracha foi fixado na armadura com braçadeiras de nylon.



Figura 19: Posicionamento do eletrodo de corrosão

O sistema de fixação do eletrodo foi posicionado a cada 7 cm, conforme a Figura 20, evitando que ocorresse o contato entre o eletrodo e a armadura durante o processo de concretagem. A instalação dos eletrodos foi realizada em todas as vigas. Também foi fixado um fio condutor em contato com a armadura para aferir a existência de circuito elétrico (Figura 20). Previamente à concretagem, caso fosse confirmada a formação do circuito, a viga em questão não era submetida ao processo de corrosão acelerada.

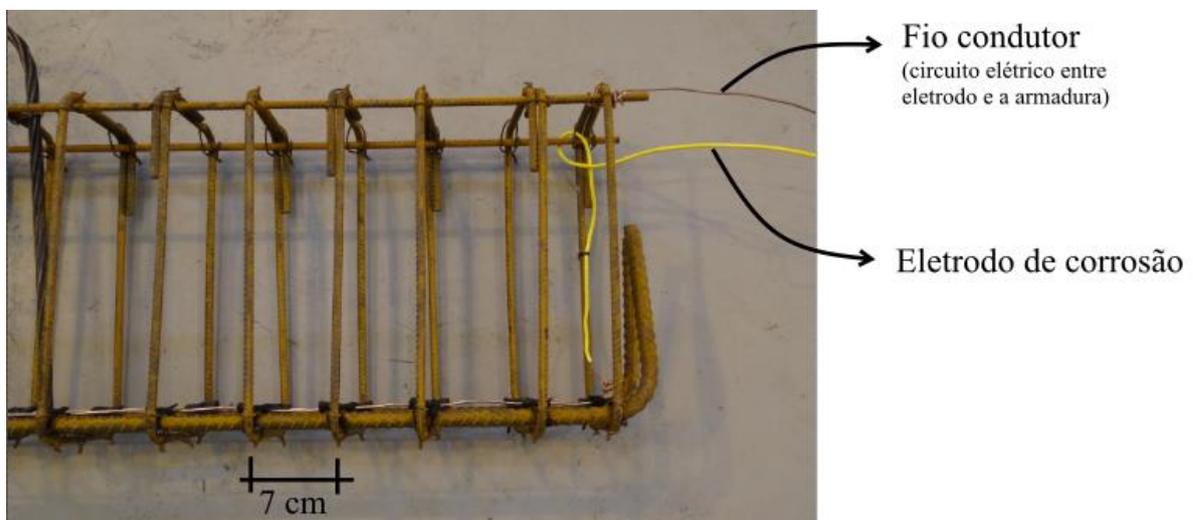


Figura 20: Fixação do eletrodo de corrosão e fio condutor

### 3.5 CONCRETAGEM

Finalizada a etapa de instalação dos eletrodos de corrosão, as armaduras foram enviadas para a concretagem. Como descrito anteriormente, a concretagem foi realizada por empresa

especializada em estruturas pré-moldadas e foram concretadas 50 vigas de concreto armado. Como citado, na impossibilidade de concretar todas ao mesmo tempo, devido a limitação da linha de produção, a concretagem foi dividida em seis lotes com, no máximo, nove vigas em cada lote.

A central de concreto utilizada, com capacidade de 3 m<sup>3</sup>, fazia a dosagem dos materiais em massa. Para cada lote o processo de concretagem, da mistura até o acabamento da última viga, durou 60 minutos e foi supervisionado pelo autor desta tese para garantir o atendimento às normas NBR 12655 (ABNT, 2015) e NBR 7212 (ABNT, 2012).

A trabalhabilidade do concreto foi avaliada conforme NBR NM 67 (ABNT,1998), através do abatimento de tronco de cone. Os resultados obtidos para as seis concretagens tiveram slumps compreendidos na faixa de 160 ± 20 mm. Após esta caracterização, foi realizado o adensamento do concreto com vibrador de imersão de diâmetro de 40 mm. A sequência do processo da concretagem está apresentada na Figura 21.



Figura 21: Sequência da concretagem das vigas, posicionamento (a), lançamento e adensamento do concreto (b) e, concretagem das vigas e moldagem dos corpos de prova finalizados (c)

Para cada lote de concretagem, foram moldados corpos de prova para controlar a resistência à compressão nas idades de 7, 28, 91 dias e para rupturas nas datas de ensaios à flexão das vigas. Foram, adicionalmente, moldados corpos de prova para a determinação do módulo de elasticidade para as idades de 28 dias e de ruptura das vigas à flexão. O adensamento dos corpos de prova foi o manual, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016). A cura dos

corpos de prova foi realizada em conjunto com as das vigas, nas mesmas condições, até a ruptura.

Após o processo de moldagem das vigas, decorrido o período de duas horas, foi iniciada a cura à vapor, com temperatura de 40°C, por um tempo de aproximadamente seis horas. Esse procedimento de cura teve como objetivo elevar a resistência à compressão nas primeiras idades, a fim de evitar a fissuração das vigas no seu içamento das formas. O processo de cura à vapor também foi realizado nos corpos de prova.

O processo de cura à vapor, do primeiro lote de concretagem, foi monitorado para verificação da temperatura de cura. O processo foi realizado com o sistema de aquisição de dados automatizados, e foram utilizados termopares tipo pt100. Foram utilizados três termopares localizados na superfície e um interno à viga, localizado na metade da sua altura.

A Figura 22 mostra a evolução da temperatura de cura à vapor. Observa-se que esta temperatura não ultrapassou 40°C e, a interna do concreto ficou abaixo de 60°C, estando dentro das recomendações da NBR 9062 (ABNT, 2017) e de Mehta e Monteiro (2014). Pode-se observar que o tempo de cura à vapor, como já indicado, foi de aproximadamente seis horas.

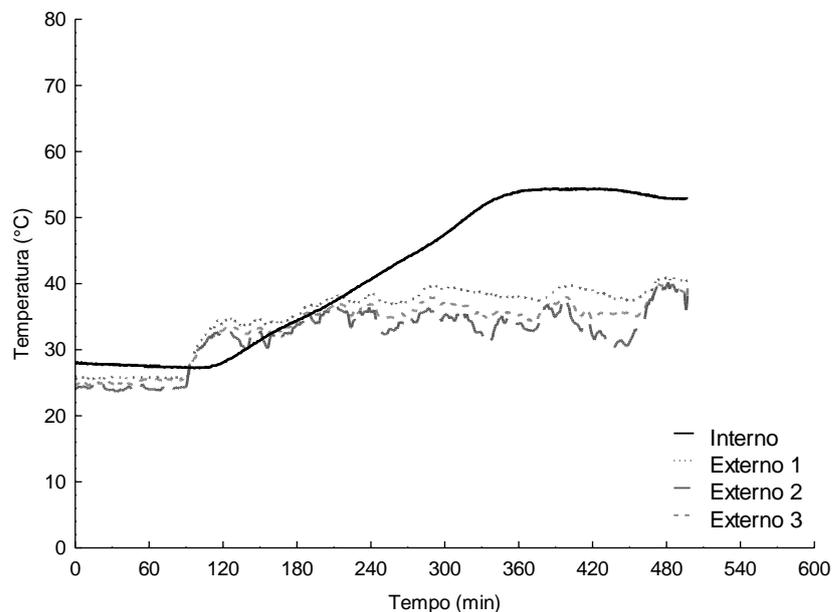


Figura 22: Evolução da temperatura de cura à vapor

Decorrido o processo de cura à vapor, as vigas permaneceram na forma até completarem doze horas e, após, foi realizado o içamento. A cura inicial foi realizada no próprio local da

concretagem. Com a idade média de sete dias, as vigas foram transportadas para o LEME, onde ficaram empilhadas e armazenadas em ambiente externo, envolvidas por uma lona plástica. Os corpos de prova foram armazenados nas mesmas condições e local das vigas. O armazenamento, em ambiente externo, deu-se em função da limitação do espaço interno.

Decorrido o período de 91 dias, foi iniciado o processo de corrosão acelerada. Este ensaio aconteceu no anexo do LEME, conforme procedimento já descrito no item 3.4.

### 3.6 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

Nas últimas décadas, a aplicação de Ensaio Não Destrutivo (END), na Engenharia Civil, tornaram-se um tema de interesse em diversos países (LORENZI *et al.*, 2015). Beutel *et al.* (2006) enfatizam que o uso de END nesta área depende da confiabilidade da aplicação dos métodos, do conhecimento sobre a aplicação e de seu aspecto econômico.

O uso de métodos de END é uma maneira de viabilizar a inspeção e a avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente (CHO, 2003). Tendo em vista que a corrosão em estruturas de concreto armado é um dos mecanismos de degradação mais frequentes, são aplicadas diferentes técnicas de END para avaliação das vigas de concreto armado desta tese. Foram aplicadas as técnicas do potencial de corrosão (item 3.6.1), da resistividade (item 3.6.2) e da taxa de corrosão (item 3.6.3).

#### 3.6.1 Potencial de Corrosão

Para a determinação do potencial de corrosão, faz-se necessário a localização das barras da armadura. Para isso foi utilizada a detecção por pacometria, utilizando pacômetro modelo Profometer 600, marca Proceq, conforme mostrado na Figura 23.



Figura 23: Localização das armaduras por pacometria e marcação do grid de leitura para avaliação por END

A medida do potencial de corrosão da armadura consiste no registro da diferença de tensão entre a armadura e um eletrodo de referência, que é colocado em contato com a superfície do concreto. Trata-se de uma técnica qualitativa que oferece dados sobre a probabilidade de haver corrosão na armadura analisada. O procedimento de ensaio segue a Norma ASTM C-876 (ASTM, 2015) – *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. A Norma estabelece uma correlação entre os intervalos de diferença de potencial, em relação ao eletrodo de referência de Cu/CuSO<sub>4</sub> (Cobre/Sulfato de Cobre), em termos de probabilidade de corrosão, conforme pode ser observado no Quadro 13.

Diferença de Potencial (ddp)	Probabilidade de Corrosão
$ddp > -200 \text{ mV}$	Probabilidade corrosão menor que 10%
$-200 \text{ mV} \leq ddp \leq -350 \text{ mV}$	Probabilidade incerta de corrosão 50%
$ddp < -350 \text{ mV}$	Probabilidade corrosão maior que 90%

Quadro 13 Correlação entre os valores de ddp e a probabilidade de corrosão

(Fonte: adaptado ASTM C-876, 2015)

Para a realização do ensaio, foi utilizado o equipamento Gecor 8, com um eletrodo de referência, que neste caso foi o de Cu/CuSO<sub>4</sub>. O polo negativo é conectado ao eletrodo, enquanto, o positivo, é conectado à barra de armadura através do fio de cobre que foi ligado à armadura antes da concretagem. O eletrodo é posicionado sobre a superfície do concreto de tal forma que apresente conexão elétrica com a barra de armadura. A aplicação do método e o equipamento estão apresentados na Figura 24.



Figura 24: Determinação do potencial de corrosão com o equipamento Gecor 8

A avaliação foi realizada através da elaboração de mapeamento dos potenciais de corrosão para cada viga analisada. As medições dos potenciais foram realizadas sobre cada uma das barras longitudinais, com espaçamento de 25 cm entre pontos de leitura.

### 3.6.2 Resistividade

A resistividade do concreto é um parâmetro importante na corrosão de estruturas de concreto armado. O concreto de alta resistividade tem pouca possibilidade de ter suas armaduras sofrendo processo corrosivo. Em síntese, a resistividade elétrica é determinada medindo-se as diferenças de potencial, na superfície do concreto, causadas pela aplicação de uma pequena corrente na superfície (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O Quadro 14 mostra as recomendações do *Comite Euro-International du Beton* no CEB 192 (CEB, 1988), relacionando a resistividade do concreto com a taxa provável de corrosão.

Resistividade do Concreto ( $\Omega.m$ )	Taxa provável de Corrosão
> 200	Probabilidade corrosão desprezível
100 a 200	Probabilidade de corrosão baixa
50 a 100	Probabilidade de corrosão alta
< 50	Probabilidade de corrosão muito alta

Quadro 14: Correlação entre os valores de resistividade e a probabilidade de corrosão

(Fonte: adaptado CEB 192, 1988)

Para a avaliação da resistividade, foi aplicado o método do eletrodo externo. Este método consiste em um eletrodo metálico, em forma de disco, colocado na superfície de concreto e conectado à barra da armadura: determina a resistividade entre o disco e a barra de aço. O

método segue as recomendações do RILEM TC 154 (ELSENER, B. *et al.*, 2003). Para determinação da resistividade foi utilizado o equipamento Gecor 8, com um eletrodo de referência, que neste caso foi o de Cu/CuSO<sub>4</sub>.

A avaliação resistividade foi realizada através do desenvolvimento do mapa de resistividade do concreto para cada viga analisada. A determinação da resistividade foi realizada em cada uma das barras longitudinais, com espaçamento de 25 cm entre pontos de leituras.

### 3.6.3 Taxa de corrosão

As informações quantitativas sobre a taxa de corrosão do aço no concreto são de grande importância para a avaliação dos métodos de reparo, para previsão de vida útil e avaliação estrutural de elementos com corrosão. Uma das poucas técnicas disponíveis é o método de resistência à polarização (BERTOLINI *et al.*, 2004).

A recomendação RILEM TC 154-EMC descreve o método de ensaio para a determinação da taxa de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado, através da resistência à polarização (ANDRADE *et al.*, 2004). Para sua determinação, foi empregado o equipamento Gecor 8 para as medições.

Pelo método, duas características relativas à corrosão podem ser obtidas: a densidade de corrente de corrosão instantânea ( $I_{corr}$ ) e a taxa de corrosão ( $V_{corr}$ ). Ambas podem ser utilizadas para avaliar o risco de corrosão. A densidade de corrente ( $I_{corr}$ ) é expressa usualmente em  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ : valores abaixo de 0,1 representam grau de corrosão desprezível e, os acima de 1,0, alto risco de corrosão (ANDRADE *et al.*, 2004). A velocidade de corrosão ( $V_{corr}$ ) representa a perda volumétrica do aço por unidade de área e unidade de tempo, geralmente é expressa em mm/ano. Este valor é obtido em função da densidade de corrente ( $I_{corr}$ ), através da Lei de Faraday. Para  $I_{corr}$  igual a  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , a velocidade de corrosão é equivalente a 0,0116 mm/ano considerando-se uma corrosão uniforme. Desta forma, pode, também, ser expressa correspondendo a um grau de corrosão (ANDRADE *et al.*, 2004). No Quadro 15, está relacionado o grau de corrosão em relação a densidade de corrente e a velocidade de corrosão, de acordo com Andrade *et al.* (2004)

Densidade de corrente - $I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidade de corrosão - $V_{\text{corr}}$ (mm/ano)	Grau de corrosão
$\leq 0,1$	$\leq 0,001$	desprezível
0,1 a 0,5	0,001 a 0,005	baixo
0,5 a 1,0	0,005 a 0,010	moderado
$> 1,0$	$> 0,010$	alto

Quadro 15: Faixas de valores de densidade de corrente e velocidade de corrosão relacionados à significância em termos de vida útil da armadura

(Fonte: adaptado Andrade *et al.*, 2004)

A avaliação da taxa de corrosão foi executado de acordo com as recomendações de Andrade *et al.* (2004). Foi realizado o mapeamento, em forma de grid, com leituras espaçadas a cada 25 cm, efetuadas sobre cada uma das barras da armadura longitudinal. Na Figura 25 está demonstrada a execução do método recomendado pelo RILEM TC 154-EMC.



Figura 25: Determinação da taxa de corrosão com o equipamento Gecor 8

### 3.7 ESTIMATIVA DA CARGA DE RUPTURA E DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS

Foi desenvolvida um método, baseada nas recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014), para determinação da capacidade resistente da seção transversal através da combinação do equilíbrio de tensões, da compatibilidade de deformações e das leis constitutivas dos materiais na ruptura. O método foi adaptado para a verificação dos efeitos da corrosão e para o dimensionamento da recuperação em UHPFRC. Já para o dimensionamento do reforço em Concreto Têxtil, foi

aplicada o método apresentado por Giese (2019). Foram desprezadas as tensões de tração do concreto, como premissa, e considerou-se uma ligação perfeita entre os materiais, tanto para o UHPFRC quanto para o Concreto Têxtil, e foi considerada a hipótese de Bernoulli.

### 3.7.1 Descrição dos modelos resistentes à flexão das vigas de concreto armado

A análise no estado limite último permite determinar a capacidade resistente da seção transversal por uma combinação de equilíbrio de tensões, compatibilidade de deformação e as leis constitutivas dos materiais (BEBER, 2003).

Para a avaliação do estado limite último foram desenvolvidos os modelos resistentes à flexão para as diferentes vigas analisadas no estudo experimental. Para vigas de concreto armado integras, ou seja, sem processo corrosivo, o modelo está apresentado no item 3.7.1.1. Na sequência, é desenvolvido o modelo para as vigas de concreto armado corroídas (item 3.7.1.2). A fim de dimensionar os reforços necessários para a recuperação do desempenho estrutural das vigas de concreto armado corroídas, foi idealizado um modelo para a recuperação com UHPFRC (item 3.7.1.3) e para a recuperação com Concreto Têxtil (item 3.7.1.4).

#### 3.7.1.1 Vigas de concreto armado íntegras

Em um estado de flexão, as distribuições de tensão e de deformação, para uma seção de concreto armado, são ilustradas na Figura 26. Ressalta-se que, além de não impor nenhum fator de minoração à resistência do material, não é considerado o efeito do carregamento de longo prazo (efeito Rüşh). Dessa forma, esses resultados podem ser comparados diretamente com os resultados experimentais.

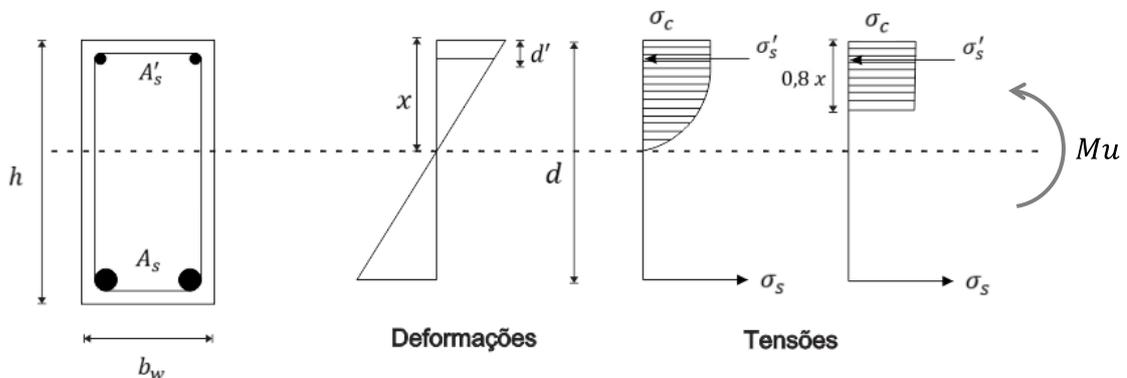


Figura 26: Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal de uma viga submetida a flexão

O método aplicado para a determinação da capacidade resistente das vigas de concreto armado à flexão está representada no fluxograma da Figura 27.

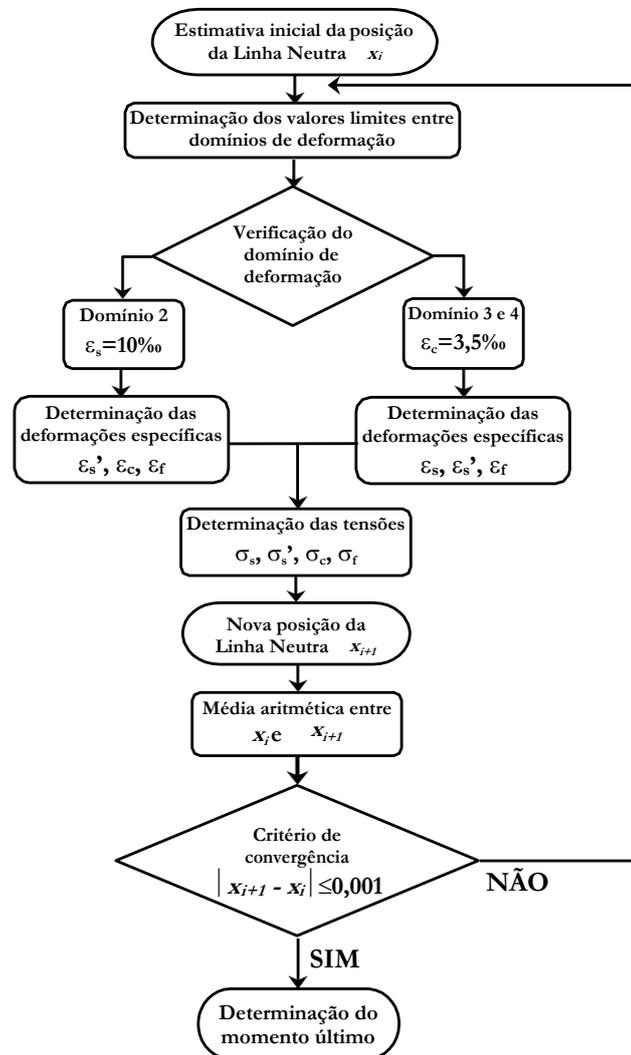


Figura 27: Fluxograma para a determinação da capacidade resistente à flexão

(Fonte: Beber, 2003)

O método é um processo iterativo, no qual são determinados a posição da linha neutra, os valores das deformações e das tensões até que seja atingida a convergência. Após a convergência, determina-se o momento fletor último ( $M_u$ ), obtido através do equilíbrio das forças, que concorrem na seção (Figura 26), e é dado pela Equação 3:

Equação 3

$$M_u = \sigma_s \cdot A_s \cdot d - 0,32 \cdot b_w \cdot \sigma_c \cdot x^2 - \sigma_s' \cdot A_s' \cdot d'$$

Onde,

- $M_u$  = momento fletor último;  
 $\sigma_s$  = tensão na armadura longitudinal positiva;  
 $\sigma'_s$  = tensão na armadura longitudinal negativa;  
 $\sigma_c$  = tensão à compressão do concreto;  
 $A_s$  = área da seção transversal da armadura longitudinal positiva;  
 $A'_s$  = área da seção transversal da armadura longitudinal negativa;  
 $d$  = distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura positiva;  
 $d'$  = distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura negativa;  
 $b_w$  = largura da base da viga;  
 $x$  = posição da linha neutra.

Para o cálculo da tensão de compressão do concreto, foi considerado o diagrama tensão-deformação idealizado proposto na NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme a Equação 4. Para o cálculo das forças atuantes na seção e do momento último, foi adotada a simplificação do diagrama parábola retângulo.

Equação 4

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right]$$

Onde,

- $f_c$  = resistência à compressão do concreto;  
 $\varepsilon_c$  = deformação específica no concreto;  
 $\varepsilon_{c2}$  = deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico.

Para as tensões atuantes nas armaduras, admitiu-se um comportamento elastoplástico perfeito do aço. Na Equação 5, está apresentada a tensão antes de atingir o escoamento, e na Equação 6, após atingi-lo.

Equação 5

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s$$

Equação 6

$$\sigma_s = f_y$$

Onde,

- $E_s$  = módulo de elasticidade do aço;  
 $\varepsilon_s$  = deformação específica no aço;  
 $f_y$  = tensão de escoamento do aço.

### 3.7.1.2 Vigas de concreto armado corroídas

A corrosão das armaduras causa diversos efeitos deletérios quanto ao desempenho estrutural de elementos de concreto armado. Uma revisão sobre esse tema foi apresentada do Capítulo 2 desta tese. A avaliação da redução da capacidade estrutural de elementos de concreto armado corroídos é complexa devido, justamente, aos diversos efeitos deletérios gerados. Para determinar a capacidade resistente última de vigas de concreto armado corroídas, foi adotada também o método apresentado no item 3.7.1.1. Entretanto foi desenvolvida uma adaptação, considerando os efeitos da corrosão no comportamento estrutural.

Os efeitos da corrosão nas armaduras, de forma simplificada, foram considerados sobre a resistência à tração do aço e à área de aço da armadura. A resistência à tração do aço é determinada pela Equação 7, segundo proposto por Du, Clark e Chan (2005), considerando o grau de corrosão:

Equação 7

$$\sigma_s^{corr} = (1 - 0,005 Q_{corr}) f_y$$

Onde,

$\sigma_s^{corr}$  = tensão de tração no aço considerando os efeitos da corrosão;  
 $Q_{corr}$  = grau de corrosão expresso em termos da redução da seção da armadura;  
 $f_y$  = tensão de escoamento do aço, sem efeitos da corrosão.

O valor do grau de corrosão ( $Q_{corr}$ ) pode ser determinado de acordo com a perda de massa pelo processo corrosivo ou através da redução do diâmetro da armadura, conforme a Equação 8:

Equação 8

$$Q_{corr} = \left(1 - d_{corr}/d\right)^2$$

Onde,

$d_{corr}$  = diâmetro da armadura corroída;  
 $d$  = diâmetro da armadura não corroída.

Correlacionando o grau de corrosão com a redução da área de aço, área da armadura corroída ( $A_{s_{cor}}$ ) é determinada pela Equação 9:

$$A_s^{corr} = (1 - 0,01 Q_{corr}) A_s$$

Onde,

$A_s^{corr}$  = área de aço da armadura corroída;  
 $A_s$  = área de aço da armadura não corroída.

Aplicando a Equação 7 e a Equação 9 no método iterativo, conforme fluxograma apresentado na Figura 27, foi determinado o momento fletor último das vigas, considerando a corrosão das armaduras ( $M_u^{corr}$ ), obtido através do equilíbrio das forças, que concorrem na seção, dado pela Equação 3:

Equação 10

$$M_u^{corr} = \sigma_s^{corr} \cdot A_s^{corr} \cdot d - 0,32 \cdot b_w \cdot \sigma_c \cdot x^2 - \sigma_s' \cdot A_s' \cdot d'$$

Onde,

$M_u^{corr}$  = momento fletor último da considerando a corrosão das armaduras.

### 3.7.1.3 Vigas de concreto armado corroídas e recuperadas com UHPFRC

Para a estimativa da carga de ruptura para as vigas recuperadas com UHPFRC, foi adaptado o método apresentado no item 3.7.1.1. Para isso foram consideradas as distribuições de deformações e tensões apresentadas na Figura 28, para a seção transversal da viga.

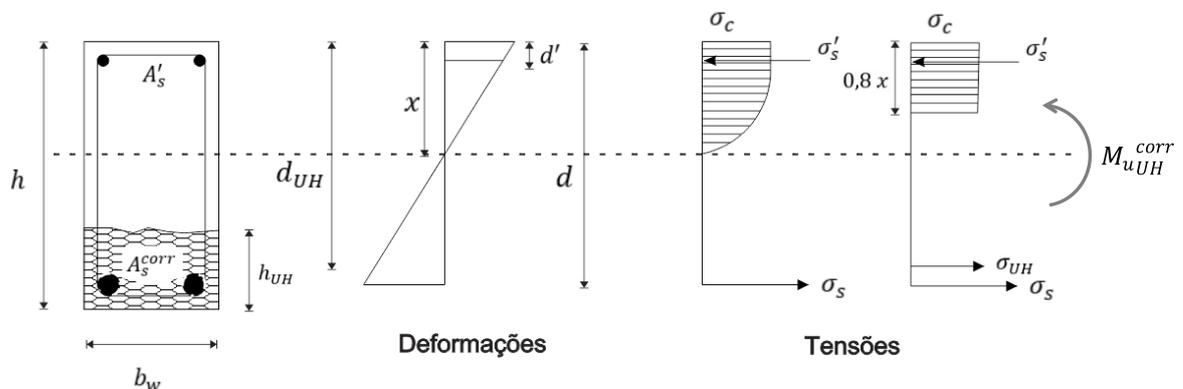


Figura 28: Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal de uma viga submetida a flexão com recuperação com UHPFRC

O comportamento do UHPFRC, à tração, está idealizado na Figura 10, apresentada no item 2.3.1.3. Para a determinação da resistência última da viga recuperada com UHPFRC, foi considerado o comportamento simplificado. O primeiro estágio foi considerado até a formação da primeira fissura, indicado como fase I na Figura 10. O segundo estágio foi considerado após a formação da primeira fissura até o rompimento do material, indicado na Figura 10 como fases II, III e IV.

Graybeal e Baby (2013) concluem que a formação da primeira fissura ocorre na deformação específica entre 0,00015 e 0,0003, variando em função do tipo e fibra utilizada. Tendo em vista que foram utilizadas fibras curtas, será adotado o valor de 0,00015. Portanto no processo de verificação da viga reforçada com UHPRF, foi considerado o comportamento elástico linear até esse patamar de deformação específica, apresentado na Equação 11:

Equação 11

$$\sigma_{UH} = E_{UH} \cdot \varepsilon_{UH}$$

Onde,

$\sigma_{UH}$  = tensão de tração no UHPFRC;  
 $E_{UH}$  = módulo de elasticidade do UHPFRC;  
 $\varepsilon_{UH}$  = deformação específica do UHPFRC, limitada até 0,00015.

Russel e Graybeal (2013) indicam que a tensão de tração última ocorre quando a deformação específica do material atinge 0,007. Portanto, no processo de verificação, foi considerado o comportamento constante da tensão de tração do UHPFRC, quando a deformação específica do material está compreendida entre os valores de 0,00015 e 0,007, conforme apresentado na Equação 12:

Equação 12

$$\sigma_{UH} = f_{tUH}$$

Onde,

$f_{tUH}$  = tensão de tração máxima do UHPFRC, para a deformação específica compreendida entre 0,00015 e 0,007

Para as verificações iniciais, foi adotada uma resistência à compressão de 140 MPa. Definido este valor, foi determinada o módulo de elasticidade do UHPFRC, segundo apresentado por Russel e Graybeal (2013) na Equação 13:

Equação 13

$$E_{UH} = 46200 \cdot \sqrt{f_{cUH}}$$

Onde,

$E_{UH}$  = módulo de elasticidade do UHPFRC, em psi;  
 $f_{cUH}$  = resistência à compressão, expressa em psi.

A tensão de tração máxima do UHPFRC, foi determinada, segundo apresentado por Russel e Graybeal (2013), na Equação 14:

Equação 14

$$f_{tUH} = 6,7 \cdot \sqrt{f_{cUH}}$$

Onde,

$f_{tUH}$  = tensão de tração máxima do UHPFRC;  
 $f_{cUH}$  = resistência à compressão, expressa em psi.

A área corroída a ser recuperada com reforço de UHPFRC, é apresentada na Figura 29, sendo removido o concreto corroído conforme indicado. Desta forma, a determinação da área de reforço do UHPFRC será calculada em função da base da viga (bw) e a altura do reforço em UHPFRC, conforme a Equação 15.

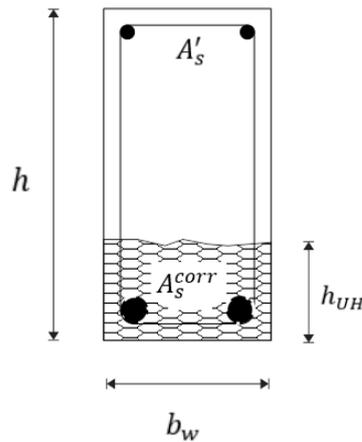


Figura 29: Área corroída a ser recuperada com reforço de UHPFRC

Equação 15

$$A_{UH} = b_w \cdot h_{UH}$$

Onde,

- $A_{UH}$  = área do reforço do UHPFRC;  
 $b_w$  = base da viga;  
 $h_{UH}$  = altura do reforço em UHPFRC.

Considerando os parâmetros relativos à corrosão da armadura e ao reforço com UHPFRC, foram aplicadas tanto a Equação 12 quanto a Equação 15, no método iterativo, conforme fluxograma apresentado na Figura 27. Entretanto, neste procedimento, foi determinada a altura do reforço em UHPFRC, a fim de que o momento último fosse igual ao momento fletor último da viga íntegra, ou seja, sem corrosão. Esse procedimento foi realizado com a finalidade de recuperar a capacidade estrutural da viga corroída com o uso do UHPFRC. O equilíbrio das forças, que concorrem na seção, é dado pela Equação 16. Na Equação 17, são iguados os momentos últimos da viga recuperada com UHPFRC com o da viga sem corrosão, possibilitando a determinação da altura da camada de recuperação em UHPFRC:

Equação 16

$$M_{uUH}^{corr} = \sigma_s^{corr} \cdot A_s^{corr} \cdot d + \sigma_{UH} \cdot A_{UH} \cdot d_{UH} - 0,32 \cdot b_w \cdot \sigma_c \cdot x^2 - \sigma'_s \cdot A'_s \cdot d'$$

$$M_{uUH}^{corr} = Mu$$

Onde,

$M_{uUH}^{corr}$  = fletor último da considerando a corrosão das armaduras e reforço em UHPFRC.

$d_{UH}$  = distância entre a fibra mais comprimida e o centroide do têxtil;

$Mu$  = momento fletor último considerando a viga íntegra, sem corrosão (item 3.7.1.1).

#### 3.7.1.4 Vigas de concreto armado recuperadas com concreto têxtil

Para a estimativa da carga de ruptura para as vigas recuperadas com Concreto Têxtil, foi adaptado o método apresentado no item 3.7.1.1, conforme apresentado por Giese (2019). Para isto foram consideradas as distribuições de deformações e tensões apresentadas na Figura 30 na seção transversal da viga. Não foi considerada a resistência à tração da argamassa de recuperação para a determinação do momento resistente da seção.

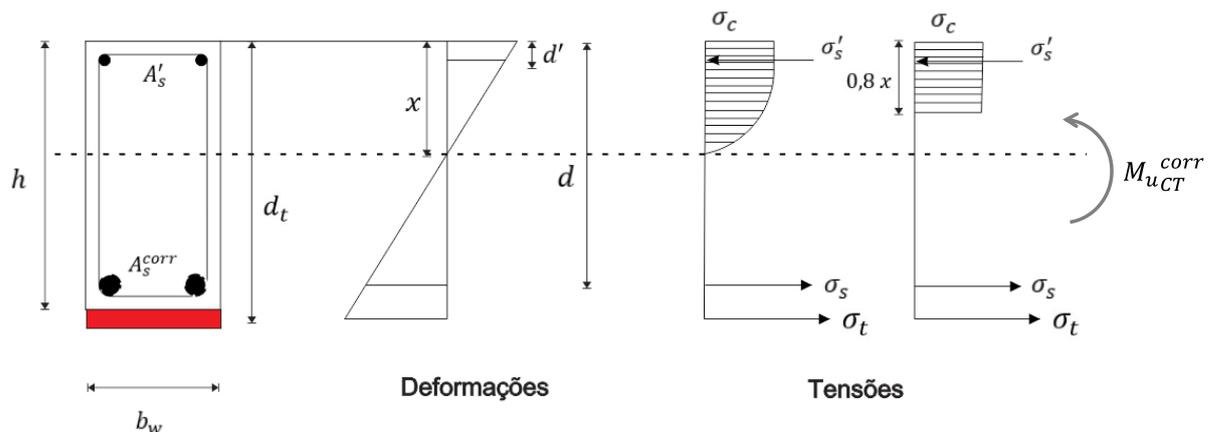


Figura 30: Diagrama esquemático de equilíbrio da seção transversal de uma viga submetida a flexão com recuperação com Concreto Têxtil

O comportamento do têxtil foi admitido como linear-elástico até sua ruptura, conforme indicado pela Equação 18:

$$\sigma_t = E_t \cdot \varepsilon_t$$

Onde,

$\sigma_s$  = tensão no têxtil;

$E_t$  = módulo de elasticidade têxtil;

$\varepsilon_t$  = deformação específica no têxtil.

Para a área na qual é aplicado no reforço de têxtil, foi adotada a aproximação sugerida por Giese (2019), em função dos dados fornecidos pelo fabricante do têxtil. Pela Equação 19, obtém-se a área de reforço têxtil para uma camada em função da densidade, da gramatura e da largura da tira:

Equação 19

$$A_t = \frac{g}{\rho} \cdot b$$

Onde,

$A_t$  = área do têxtil, em cm<sup>2</sup>;  
 $g$  = gramatura da malha têxtil, em g/cm<sup>2</sup>;  
 $\rho$  = densidade da fibra da malha têxtil, em g/cm<sup>3</sup>;  
 $b$  = largura da tira de reforço, em cm.

Considerando os parâmetros relativos à corrosão da armadura e ao reforço com Concreto Têxtil, foram aplicadas tanto a Equação 18 quanto a Equação 19, no método iterativo, conforme fluxograma apresentado na Figura 27. Entretanto, neste procedimento, foi determinado o número necessário de camadas para a malha têxtil, a fim de que o momento último fosse igual ao momento fletor último da viga íntegra, ou seja, sem corrosão. Esse procedimento foi realizado com a finalidade de recuperar a capacidade estrutural da viga corroída com o uso do Concreto Têxtil. O equilíbrio das forças, que concorrem na seção, é dado pela Equação 20. Na Equação 21, são iguados os momentos últimos da viga recuperada com concreto têxtil com o da viga sem corrosão, possibilitando a determinação do número de camadas do Concreto Têxtil:

Equação 20

$$Mu_t^{corr} = \sigma_s^{corr} \cdot A_s^{corr} \cdot d + \sigma_t \cdot n \cdot A_t \cdot d_t - 0,32 \cdot b_w \cdot \sigma_c \cdot x^2 - \sigma'_s \cdot A'_s \cdot d'$$

Equação 21

$$Mu_t^{corr} = Mu$$

Onde,

$Mu_t^{corr}$  = fletor último da considerando a corrosão das armaduras e reforço em Concreto Têxtil.

- $d_t$  = distância entre a fibra mais comprimida e o centroide do têxtil;  
 $n$  = número de camadas da malha têxtil;  
 $Mu$  = momento fletor último considerando a viga íntegra, sem corrosão (item 3.7.1.1).

### 3.7.2 Estimativa do momento de ruptura das vigas e dimensionamento dos reforços

Foram verificadas as estimativas de ruptura para as vigas sem corrosão, com diferentes graus de corrosão e com UHPFRC e com Concreto Têxtil. Os parâmetros utilizados para as estimativas do momento de ruptura da viga sem corrosão, estão apresentados no Quadro 16.

Parâmetro	Valor
Altura da viga ( $h$ )	305,0 mm
Altura da viga ( $b_w$ )	155,0 mm
Altura útil da armadura positiva ( $d$ )	277,4mm
Altura útil da armadura negativa ( $d'$ )	27,6 mm
Diâmetro da armadura positiva ( $\emptyset$ )	6,3 mm
Diâmetro da armadura negativa ( $\emptyset'$ )	12,5 mm
Resistência à compressão do concreto ( $f_c$ )	35 MPa
Tensão de escoamento do aço ( $f_y$ )	670 MPa
Módulo de elasticidade do aço ( $E_s$ )	210 GPa
Deformação específica de escoamento do aço ( $\epsilon_s$ )	3,19 ‰

Quadro 16: Dados adotados para verificação do momento último de ruptura da vigas sem corrosão

Aplicando os dados do Quadro 16 no modelo resistente à flexão para a viga sem corrosão (item 3.7.1.1), é obtido um momento resistente último ( $Mu$ ) de 4240,5 kN.cm.

Para avaliar os efeitos da corrosão, no momento resistente último da viga, foi considerado o efeito expresso em termos perda de massa da armadura. Os parâmetros utilizados, para as estimativas do momento de ruptura das vigas com corrosão, estão apresentados no Quadro 17.

Parâmetro	Grau de corrosão		
	5%	10%	15%
Diâmetro da armadura positiva não corroída ( $d$ )	12,5 mm	12,5 mm	12,5 mm
Diâmetro da armadura positiva corroída ( $d_{corr}$ )	11,88 mm	11,25 mm	11,63 mm
Grau de corrosão ( $Q_{corr}$ )	9,75%	19,00%	27,75%
Tensão de escoamento do aço ( $f_y$ )	670 MPa	670 MPa	670 MPa
Tensão no aço sobre efeitos da corrosão ( $\sigma_s^{corr}$ )	637,3 MPa	606,3 MPa	577,0 MPa
Área de aço da armadura corroída ( $A_s^{corr}$ )	110,75 mm <sup>2</sup>	99,40 mm <sup>2</sup>	88,66 mm <sup>2</sup>

Quadro 17: Dados adotados para verificação do momento último de ruptura da vigas com corrosão

Aplicando os dados do Quadro 17 no modelo resistente à flexão para a viga sem corrosão (item 3.7.1.2), é obtido um momento resistente último, considerando os efeitos da corrosão das armaduras. Os valores são mostrados no Quadro 18, comparando a redução da capacidade resistente e o momento resistente sem corrosão (0% de redução da seção).

Parâmetro	Grau de corrosão			
	0%	5%	10%	15%
Grau de corrosão ( $Q_{corr}$ )	9,75%	9,75%	19,00%	27,75%
Momento fletor último da considerando a corrosão das armaduras ( $Mu^{corr}$ )	4240,5 <i>kN.cm</i>	3626,9 <i>kN.cm</i>	3107,0 <i>kN.cm</i>	2645,8 <i>kN.cm</i>
Redução da capacidade resistente	-	14,4 %	26,7 %	37,6%

Quadro 18: Momento último de ruptura da vigas com corrosão

De acordo com as verificações analíticas, como esperado, houve uma perda da capacidade resistente das vigas com corrosão. A redução ocorreu, proporcionalmente, conforme o aumento do grau de corrosão.

Identificando a redução do momento resistente das vigas, foi realizado o dimensionamento das técnicas de recuperação, ou seja, dimensões para a recuperação em UHPFRC e número de camadas necessários para a recuperação em Concreto Têxtil, para recuperar a capacidade resistente das vigas corroídas. Para isso foi considerado, como momento resistente das vigas corroídas recuperadas, valor igual ou superior ao momento das vigas sem corrosão (4240,5 *kN.cm*). Os parâmetros utilizados na verificação estão mostrados no Quadro 19, além dos dados já apresentados nos Quadro 16 e Quadro 17.

Foram aplicados os dados do Quadro 19, no modelo resistente à flexão para as vigas corroída e recuperada com UHPFRC (item 3.7.1.3), e, no modelo com recuperação em Concreto Têxtil (item 3.7.1.4). Através dos modelos, são determinadas as dimensões necessárias para a recuperação em UHPFRC e o número de camadas necessários da malha têxtil, dados apresentados no Quadro 20. Ressalta-se que foi considerada satisfatória a recuperação da capacidade resistente, quando o momento resistente é igual ou superior ao momento da viga sem corrosão. Para a corrosão com 5% de redução da seção transversal, como informado anteriormente, não foi realizado o processo de recuperação, somente para as reduções de 10% e 15%.

Reforço	Parâmetro	Valor
UHPFRC	Deformação específica até fissuração ( $\varepsilon_{UH}$ )	0,00015
	Deformação específica última ( $\varepsilon_{UH}$ )	0,007
	Resistência à compressão ( $f_{cUH}$ )	140 MPa
	Módulo de elasticidade ( $E_{UH}$ )	45,4 GPa
	Tensão de tração máxima ( $f_{tUH}$ )	6,6 MPa
	Base do reforço ( $b_w$ )	155 mm
	Altura do reforço ( $h_{UH}$ )	<i>a definir</i>
	Área do reforço do ( $A_{UH}$ )	$155 \times h_{UH}$
Concreto Têxtil	Deformação específica última ( $\varepsilon_t$ )	0,005
	Módulo de elasticidade ( $E_t$ )	240 GPa
	Tensão de tração máxima da fibra ( $f_t$ )	1200 MPa
	Área de reforço têxtil por camada ( $A_t$ )	18,23 mm <sup>2</sup>
	Número de camadas ( $n$ )	<i>a definir</i>

Quadro 19: Dados adotados para verificação do momento último de ruptura da vigas com corrosão recuperadas

Estado	Parâmetro	Redução da seção transversal armadura por corrosão			
		0%	5%	10%	15%
Corroída	Momento fletor último da considerando a corrosão das armaduras ( $Mu^{corr}$ )	4240,5 <i>kN.cm</i>	3648,2 <i>kN.cm</i>	3107,0 <i>kN.cm</i>	2645,8 <i>kN.cm</i>
Recuperada	UHPFRC	Momento fletor último da considerando corrosão e recuperação em Concreto Têxtil ( $Mu_{UH}^{corr}$ )	-	4354,3 <i>kN.cm</i>	4312,5 <i>kN.cm</i>
		Altura da camada de recuperação ( $h_{UH}$ )	-	50 mm	60 mm
	Concreto Têxtil	Momento fletor último da considerando corrosão e recuperação em Concreto Têxtil ( $Mu_t^{corr}$ )	-	4321,6 <i>kN.cm</i>	4505,8 <i>kN.cm</i>
		Número de camadas ( $n$ )	-	2 camadas	3 camadas

Quadro 20: Momento último de ruptura da vigas com corrosão recuperadas com UHPFRC e Concreto Têxtil

Através das análises dos momentos últimos resistentes, foi determinado que a recuperação com UHPFRC, das vigas corroídas, deveria ter uma espessura de 50 mm e 60 mm, para as respectivas reduções das seções transversais de 10% e 15%. A recuperação das vigas corroídas, com Concreto Têxtil, deveria ser realizada com duas e três camadas da malha têxtil, respectivamente para as reduções das seções transversais de 10% e 15%, sendo mantida a altura de recuperação de 60 mm. Com esta consideração, seria mantida a seção original da viga. Os procedimentos de recuperação estão descritos no tópico seguinte.

### 3.8 PROCEDIMENTOS DE RECUPERAÇÃO

Um procedimento de recuperação, sucintamente, consiste na remoção do concreto degradado pelo processo corrosivo, limpeza dos produtos de corrosão das armaduras, proteção das armaduras com revestimento anticorrosivo e, por fim, a recuperação com a técnica escolhida. Neste trabalho, como detalhado, duas são as técnicas empregadas. A descrição dos procedimentos para a remoção da camada de concreto degradada e tratamento da corrosão da armadura está apresentada no item 3.8.1. A execução das recuperações estão descritas no itens seguinte: com utilização do UHPFRC, item 3.8.2, e com Concreto Têxtil, item 3.8.3. Para facilitar a execução das recuperações, os procedimentos foram realizados com a viga no sentido invertido, ou seja, com as armadura positivas para cima.

#### 3.8.1 Remoção do concreto degradado e tratamento da corrosão na armadura

Inicialmente, delimitou-se a altura a ser removida. A definição da altura foi determinada em função da necessidade da remoção dos produtos de corrosão da armadura. Foi definida a remoção de uma camada de 60 mm, medida a partir da face inferior da viga. Assim, obteve-se uma altura livre entre o concreto e barra de, aproximadamente, 2,6 cm. Essa altura é a suficiente para a remoção dos produtos de corrosão da armadura através de desgaste abrasivo. A representação da região removida do concreto está ilustrada na Figura 31.

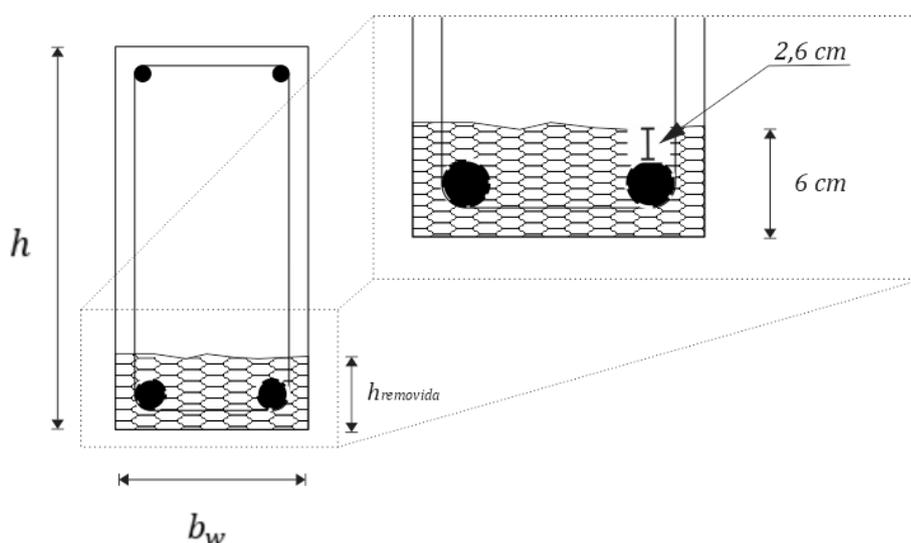


Figura 31: representação da região removida do concreto

A seguir, foi realizado corte para delimitar a remoção do concreto. O corte, feito com um disco diamantado, numa profundidade de 10 mm, evitou eventual dano na armadura transversal, visto

que o cobrimento das armaduras é de 15 mm. A Figura 32 mostra as etapas da demarcação e corte com disco diamantado.



(a)

(b)

Figura 32: Realização da demarcação e corte com disco diamantado

Em seguida, foi executada a remoção do concreto, manualmente, num primeiro momento, a fim de evitar propagação de danos para a região íntegra do concreto. Subsequentemente, foi removido com o auxílio de um rompedor mecânico, intercalando com a remoção manual. Esses procedimentos estão na Figura 33.



(a)

(b)

Figura 33 : Remoção do concreto manualmente (a) e mecanicamente (b)

Retirada a camada de concreto, realizou-se a remoção dos produtos de corrosão das armaduras, com o uso de processo abrasivo. Para isto, utilizou-se uma escova metálica rotativa, conforme retratado na Figura 34.

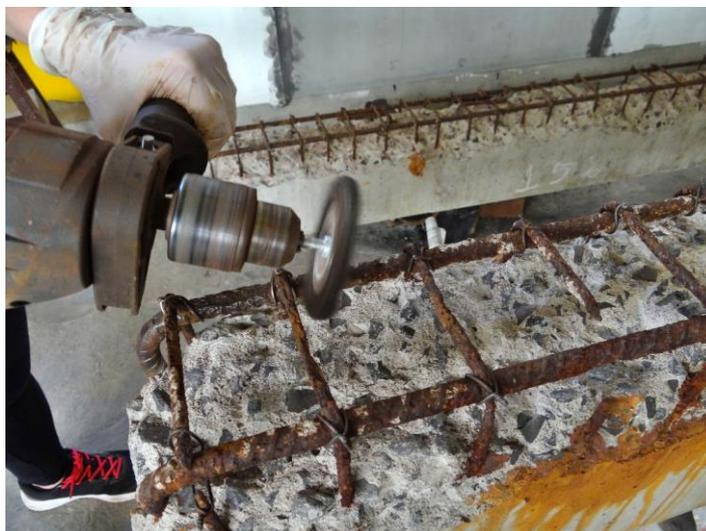


Figura 34: Remoção dos produtos de corrosão

Na Figura 35, está a comparação entre a armadura com produtos de corrosão – 35 (a) – e, após a sua remoção – 35 (b).



Figura 35: Armadura com produtos de corrosão (a) e a armadura com os produtos removidos (b)

O procedimento seguinte foi a limpeza da superfície de concreto com ar comprimido e o posicionamento da forma para a execução dos reforços. Logo após, executou-se o tratamento da armadura corroída, a fim de evitar a formação de uma possível corrosão galvânica e, ao

mesmo tempo, representar, fielmente, o processo de recuperação realizado na prática. Para isso foi utilizado uma pintura a base de epóxi rica em zinco. Este procedimento está na Figura 36.

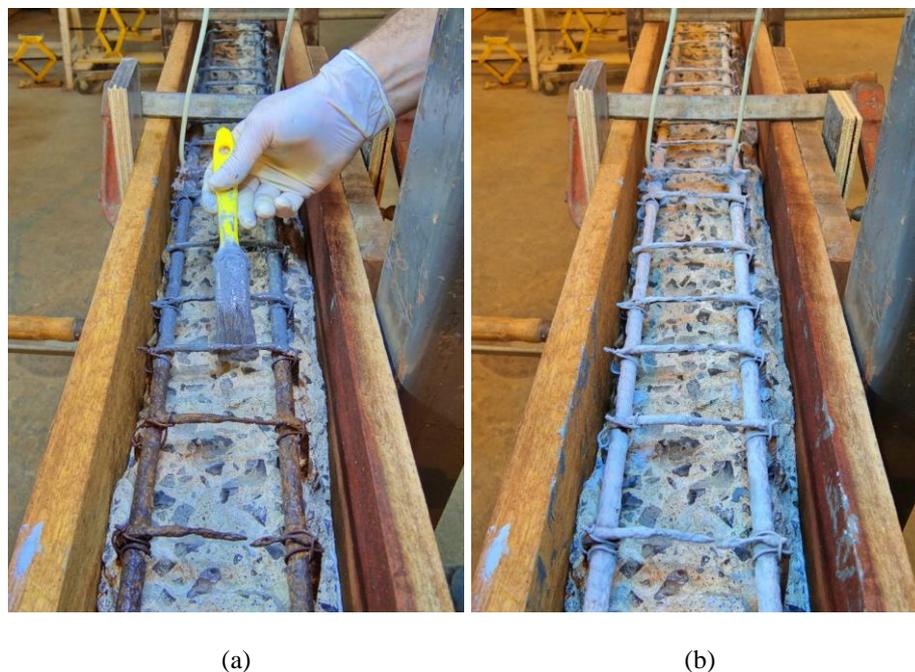


Figura 36: Tratamento da armadura corroída com pintura a base de epóxi rico em zinco (a) e, após o tempo de cura da pintura (b)

A aplicação da pintura epóxi-zinco seguiu as recomendações do fabricante: foram respeitados tanto o tempo mínimo de cura de 30 minutos quanto o tempo máximo de 180 minutos para aplicação do material de recuperação. Concluída essa etapa a viga estava preparada para a execução da recuperação.

### 3.8.2 Recuperação com UHPFRC

A recuperação com UHPFRC foi executada em quatro vigas: duas para o a redução da armadura de 10% e, duas, de 15%. O preparo do UHPFRC, deu-se em um misturador de eixo vertical e, devido às limitações do misturador, foi executada a recuperação em uma viga por vez. A sequência de mistura seguiu as orientações de Reginato (2011) e Fávero (2016). Para cada mistura, foram moldados corpos de prova, para determinar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. A moldagem seguiu as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

A recuperação das vigas corroídas, com UHPFRC, foi realizada simplesmente com o lançamento da mistura sobre a viga. Formas delimitaram as faces laterais e a espessura da camada de recuperação. Devido à dosagem do UHPFRC ter proporcionado uma mistura

autonivelante, não se necessitou de nenhum método de adensamento. O procedimento está na sequência de imagens da Figura 37.



Figura 37: Sequência da recuperação com UHPFRC

O material requer um elevado consumo de cimento e, conseqüentemente, ocorre alto calor de hidratação. Assim, para evitar efeitos da retração autógena, foi realizado o procedimento de cura úmida por um período de 72 horas. As vigas permaneceram em cura por um período de sete dias, sem ocorrência de movimentações nesse período. Na Figura 38, está uma viga já recuperada com o UHPFRC após o tempo de cura.



Figura 38: Viga recuperada com o UHPFRC

### 3.8.3 Recuperação com Concreto Têxtil

Conforme Giese (2019), na aplicação de Concreto Têxtil como reforço, a preparação da superfície, segundo pesquisadores da área, é um fator de forte influência na aderência da argamassa ao substrato e, por conseqüência, no desempenho do reforço. Tendo em vista que o procedimento de remoção do concreto degradado resultou em uma superfície com uma rugosidade elevada, não se optou por nenhum tratamento superficial do concreto.

Tomados os cuidados com a qualidade da superfície, o procedimento de recuperação das vigas corroídas com Concreto Têxtil iniciou com o preparo das tiras da malha medindo, aproximadamente, 250 cm de comprimento e 15 cm de largura, todas contendo dez urdiduras. O comprimento foi fixado em 250 cm, devido às limitações de comprimento da malha têxtil fornecida pelo fabricante. Procurou-se evitar a colocação da malha têxtil sobre a região dos apoios do ensaio de flexão, mantendo-a afastada 15 cm do apoio. O posicionamento da malha de Concreto Têxtil está ilustrado na Figura 39.

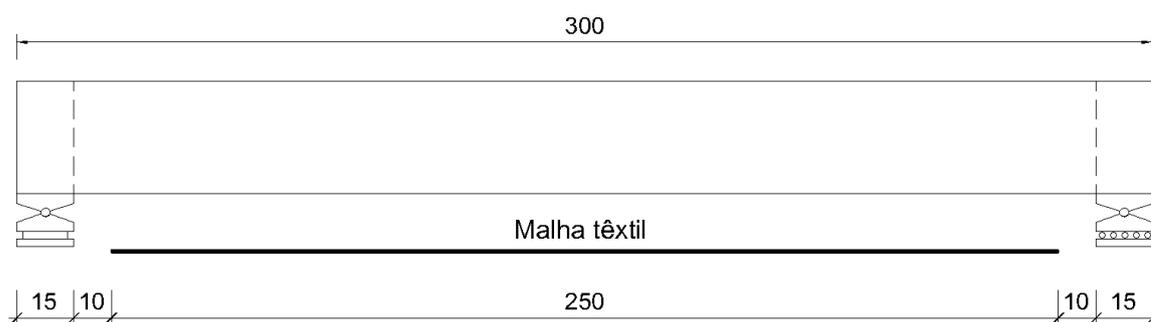


Figura 39: Posicionamento da malha de Concreto Têxtil, distâncias em centímetros

A argamassa utilizada para o reforço foi preparada conforme as recomendações do fabricante. A mistura foi realizada em um misturador de eixo vertical e, devido às limitações do misturador, assim como no caso da recuperação com UHPFRC, a recuperação deu viga à viga por mistura obtida. Para cada mistura foram moldados corpos de prova e foram determinadas, posteriormente, as resistências à compressão e à tração na flexão, e o módulo de elasticidade. As moldagem seguiram as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005) e NBR 7215 (ABNT, 1997). Além disso, também foi determinado o índice de consistência da argamassa, conforme a norma NBR 13276 (ABNT, 2016).

As vigas foram recuperadas pelo mesmo operador de acordo com o procedimento descrito por Giese (2019). Com a viga já posicionada e a forma ajustada para altura de recuperação (60 mm), a viga foi umedecida até o ponto de saturação com superfície seca, conforme orientações do fabricante da argamassa. Conforme Giese (2019), a primeira camada de argamassa é responsável por garantir a aderência entre o material de base e o de recuperação, que deve ser aplicada com energia suficiente. Para isso, a argamassa foi segmentada, com uma colher de pedreiro, e, em pequenas porções, foi lançada, energicamente, a uma distância aproximada de 50 cm. As porções foram lançadas ao longo do comprimento da viga, até a face superior das armaduras. Com auxílio de um gabarito foi realizado o espalhamento da argamassa, com movimentos

intercalados e com aplicação de pressão, formando uma espessura de 10 mm acima da armadura. O procedimento está, sequencialmente, na Figura 40.



Figura 40: Sequência da recuperação com Concreto Têxtil

Estando a argamassa espalhada, colocou-se a malha têxtil, pressionando-a, levemente, para que a argamassa ocupasse as aberturas da malha, conforme a sequência de imagens da Figura 41. Se repetiu então a aplicação da argamassa, conforme executado na primeira camada, colocando novamente a

malha têxtil. O processo foi repetido até serem executadas todas as camadas de malha têxtil para cada viga: duas camadas para as vigas com reduções das seções transversais de 10% e três camadas quando reduções de 15%. Nos dois casos, foi mantida a altura de recuperação de 60 mm.



Figura 41: Sequência de posicionamento das camadas da malha têxtil

Chegando-se a última camada, executou-se o acabamento com uma desempenadeira, por meio de movimentos circulares para garantir uma superfície lisa. Seguindo as orientações do fabricante, o procedimento de cura úmida foi mantido por um período de 72 horas. As vigas permaneceram em cura por um período de sete dias, sem que houvesse movimentações neste período. Na Figura 42 é apresentada a viga já recuperada com o concreto têxtil após o tempo de cura.



Figura 42: viga já recuperada com o Concreto Têxtil

### 3.9 METODOLOGIA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO

A importância de um estudo experimental, para compreensão do comportamento de elemento estrutural sob análise, está associada à qualidade das informações obtidas, na sua execução, e na relevância destas (BEBER, 2003). A pesquisa experimental requer a mobilização de recursos materiais, financeiros e humanos para o desenvolvimento de uma análise relevante. Portanto, uma logística experimental é indispensável a fim de otimizar o procedimento e gerar resultados com qualidade e representatividade.

O planejamento experimental desta pesquisa envolveu diferentes etapas para o desenvolvimento de metodologia de ensaio (item 3.9.1) que proporcionasse, através da instrumentação (item 3.9.2), a aquisição de dados, sobre o comportamento das vigas com acurácia.

#### 3.9.1 Metodologia de ensaio

A qualidade da metodologia proposta, associada ao rigor na condução das atividades experimentais, visam garantir a qualidade dos resultados. Nesse sentido, foi concebida uma metodologia de ensaio totalmente automatizada, tanto do ponto de vista de carregamento quanto de aquisição de dados.

Executou-se, o sistema de carregamento, através de uma prensa servo-controlada com capacidade de 2000 kN, marca Shimadzu. A taxa de carregamento, no ensaio de flexão, foi realizada com deslocamento controlado de 2 mm/min. Esse parâmetro foi definido considerando os estudos, entre outros, de Beber (2003), Garcez (2007) e Giese (2019).

Entretanto, a prensa utilizada é constituída por um quadro de reação fechado, ou seja, as reações, devido a aplicação de cargas, são absorvidas pelo próprio equipamento. Em vista dessa limitação, aliado ao comprimento das vigas, foi utilizado um perfil metálico disposto transversalmente, sobre a prensa, para possibilitar a execução do ensaio. O perfil foi dimensionado para um deslocamento mínimo, insignificante em relação aos deslocamentos das vigas. O deslocamento do perfil foi avaliado, numericamente, como sendo de 1,5 mm. Um esquema do sistema de ensaios é apresentado na Figura 43 e na Figura 44.

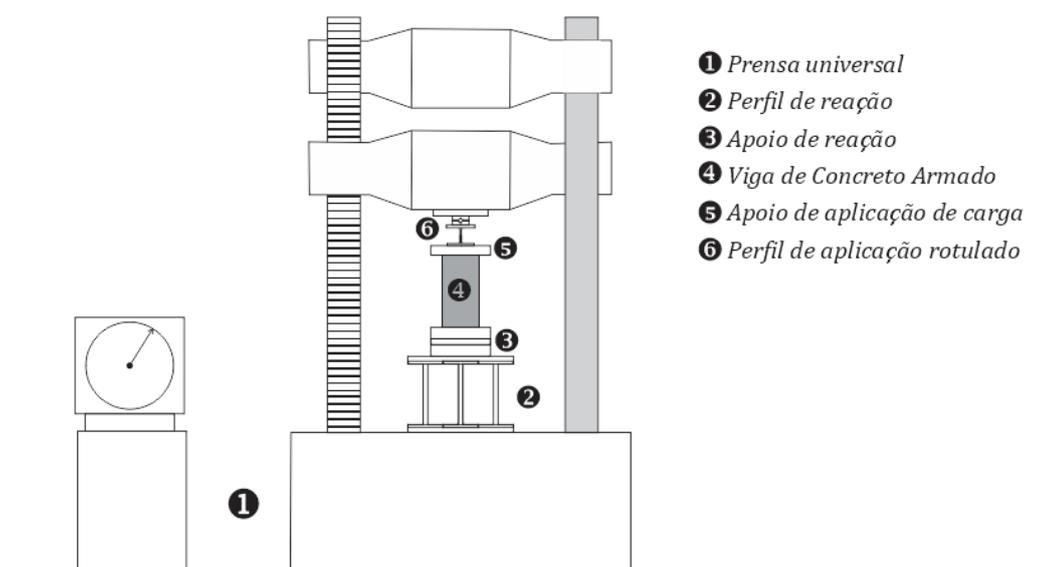


Figura 43: Vista frontal do sistema de ensaios

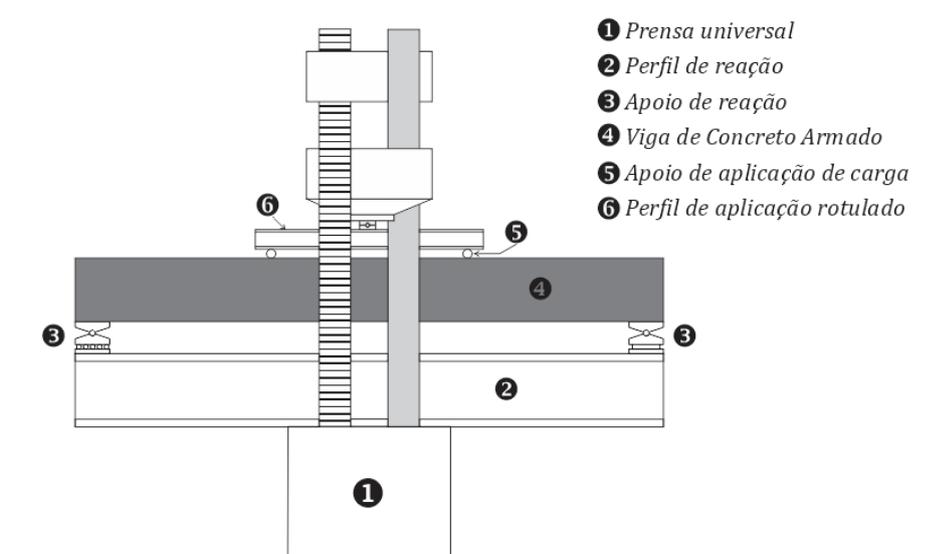


Figura 44: Vista lateral do sistema de ensaios



### 3.9.2.1 Sistema de aquisição de dados

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados universal, composto por dois módulos do equipamento *QuantumX MX840B*, da marca HBM. Cada módulo possui oito canais de leitura, sendo que os módulos foram ligados, simultaneamente, para realizar aquisição sincronizada dos dados. A frequência de leitura foi fixada em 2 Hz e foi utilizado software *Catman Easy*, versão 4.5, para coleta dos dados.

### 3.9.2.2 Força

As cargas foram aplicadas pela prensa universal. A aquisição dos dados da prensa, relativo à força, ocorreu por um transdutor de tensão linear, conectado ao sistema de aquisição de dados.

### 3.9.2.3 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais foram determinados através de LVDTs (*Linear Variation Displacement Transducer*), monitorando o ensaio de flexão. O princípio de funcionamento consiste na determinação de uma medida linear de deslocamento, a partir da indução eletromagnética entre um conjunto de bobinas conhecidas. Cada transdutor é calibrado para que seja possível estabelecer essa correlação.

O principal valor de deslocamento vertical é avaliado na seção central, por meio de um transdutor em cada face da viga, conforme ilustrado na Figura 47. Entretanto foram instrumentados outros pontos, ao longo da viga, como ilustrado, anteriormente, na Figura 46, para a obtenção da curva deformada da viga.

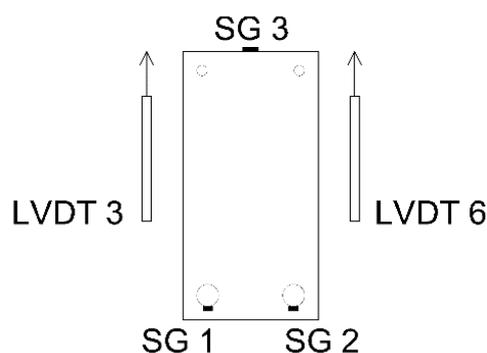


Figura 47: Localização dos sensores de deslocamentos na seção central

No centro da viga e nos pontos de aplicação de carga, foram utilizados LVDTs, marca HBM, com curso de  $\pm 25,00$  mm e precisão de 0,01 mm. Nos pontos localizados entre os apoios de reação e o ponto de aplicação de carga, empregou-se LVDTs, da mesma marca, mas com curso de  $\pm 5,00$  mm e precisão de 0,001 mm.

Para determinar os deslocamentos verticais, com maior proximidade entre o valor obtido experimentalmente e o verdadeiro na medição, evitando efeitos indiretos, foi desenvolvido um sistema de fixação baseado no dispositivo “yoke”. O dispositivo “yoke” é baseado nas recomendações do TC162 TDF (RILEM, 2002) e da norma Japonesa SF4 (JSCE, 1984) para a determinação da tenacidade de prismas de concreto.

O sistema de fixação embasa-se no comportamento estrutural da viga de concreto armado, submetida ao ensaio de flexão à quatro pontos. Duas hipóteses foram levantadas: primeira – o deslocamento vertical da viga, relativo ao apoio de reação, é próximo a zero; segunda – tanto o deslocamento horizontal quanto a rotação são próximos à zero sobre no eixo neutro (linha neutra) da viga. Considerando-se estas hipóteses, foi desenvolvido o sistema, com um perfil tubular metálico fixado na posição mostrada na Figura 48, considerando o pressuposto que o deslocamento relativo vertical, horizontal e de rotação são próximos a zero em relação ao apoio de reação.

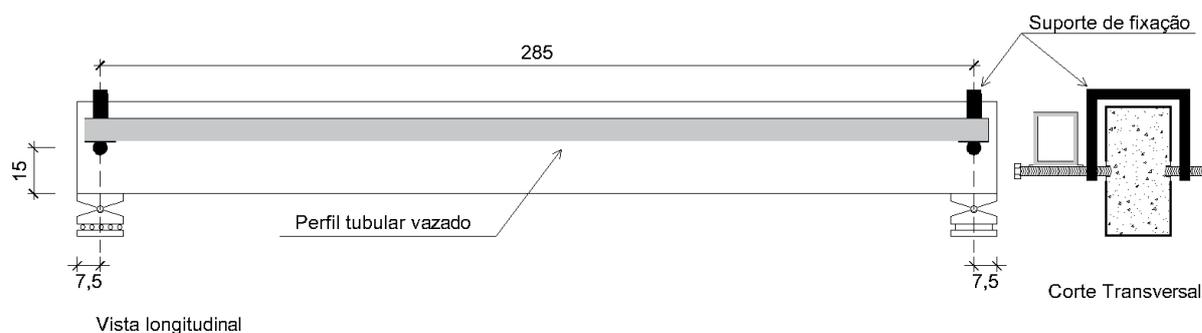


Figura 48: sistema de fixação baseado no dispositivo “yoke”, distâncias em centímetros

O sistema de suporte para os LVDTs pode ser observado na sequência de fotografias da Figura 49, demonstrado o sistema de fixação e o perfil tubular vazado – 49 (a) – e o posicionamento do LVDTs através de base magnética – 49 (b).



Figura 49: Fixação do sistema de suporte dos LVDTs (a) e, fixação do LVDT no suporte (b)

#### 3.9.2.4 Deformação específica do concreto

A deformação específica do concreto foi determinada através de medição com extensômetros (*strain gages*). Para todas as vigas ensaiadas, utilizou-se *strain gages*, marca KYOWA, com 20 mm de comprimento, resistência de 120 ohms e *gauge factor* de 2,11. Os extensômetros para medição da deformação do concreto foram fixados no centro da viga e na face superior.

A instalação do extensômetro iniciou pela preparação da superfície. Empregando uma micro retífica foi removida a camada superficial do concreto, expondo os agregados. Para garantir uma superfície lisa e, perfeitamente, aderida ao concreto, utilizou-se um sistema à base de epóxi bicomponente, prime e resina epóxi. A preparação e aplicação do sistema epóxi estão mostradas na sequência de imagens da Figura 50.

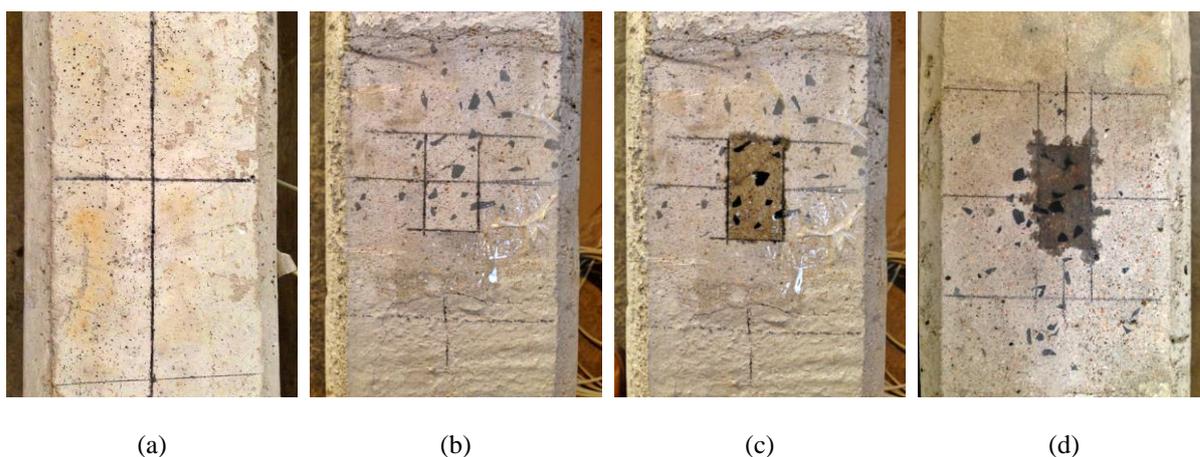


Figura 50: Instalação do extensômetro no concreto: marcação da posição (a), remoção da nata de cimento e delimitação (b), aplicação do primer (c) e pós aplicação da resina e marcação da posição do extensômetro(d)

A instalação do extensômetro iniciou pela preparação da camada da resina, desgaste abrasivo, e limpeza com éter etílico. Após, posicionou-se o extensômetro sobre as linhas de referência, usando uma fita adesiva. Para aderir o extensômetro, adotou-se um adesivo instantâneo de secagem rápida, mantendo o extensômetro pressionado com o adesivo sobre a superfície por 10 segundos. Em seguida, ligou-se o extensômetro ao conector do sistema de aquisição de dados e, por fim, foi efetuada a proteção do extensômetro. A sequência da instalação está mostrada na Figura 51.

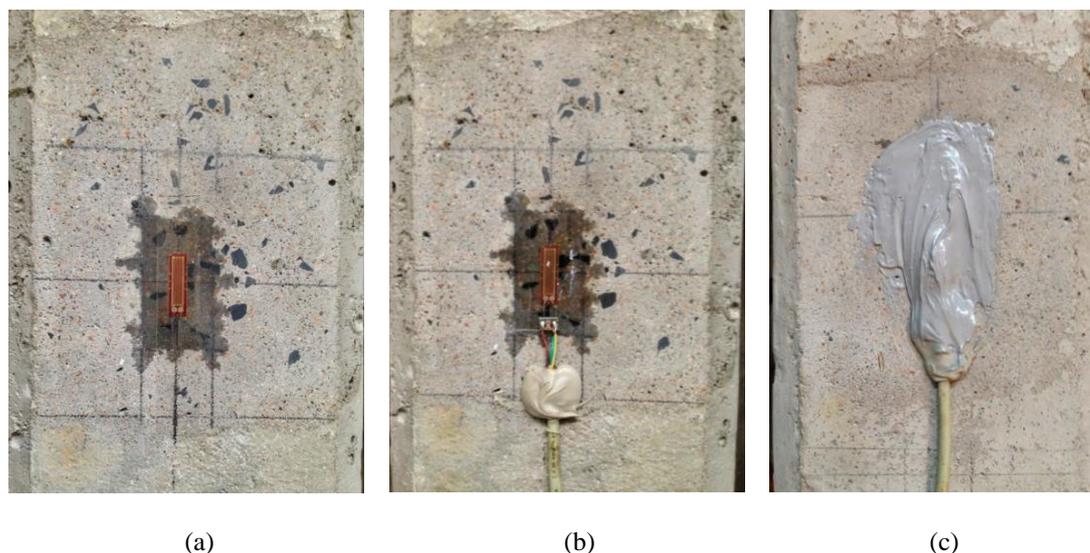


Figura 51: Instalação do extensômetro no concreto: posicionamento com fita adesiva e colagem (a), solda do extensômetro no cabo de aquisição de dados (b) e, proteção do extensômetro (b)

### 3.9.2.5 Deformação específica da armadura

Determinou-se a deformação específica nas armaduras através de medição com extensômetros (*strain gages*). Para todas as vigas ensaiadas, utilizou-se *strain gages*, marca KYOWA, com 10 mm de comprimento, resistência de 120 ohms e *gauge factor* de 2,11.

A instalação dos extensômetros foi realizada após a concretagem das vigas, sendo posicionados no centro das duas armaduras positivas. Para isto, foi demarcada a posição central e localização das armaduras, e, em seguida, realizou-se uma abertura no concreto expondo a armadura. Este procedimento, realizado com cuidado, evitou danificar excessivamente o concreto. Para garantir uma superfície plana, foi preparada a superfície da armadura, com uma micro retífica e fita abrasiva, removendo as impurezas e nervuras da armadura. Em seguida, efetivou-se a limpeza com éter etílico, posicionado o extensômetro e fixando-o com adesivo instantâneo de contato. Na Figura 52, é apresentada a abertura realizada na viga e o extensômetro colado na armadura. Após a fixação do extensômetro, o cabo de transmissão de dados foi posicionado na superfície de concreto e soldado no extensômetro, conforme Figura 53.

Para proteção do extensômetro, utilizou-se uma camada de fita de auto fusão e, sobreposta, aplicada uma camada de poliuretano. Procedeu-se a recuperação da abertura no concreto com argamassa de recuperação empregando a descrita no item 3.2.3.1



Figura 52: Abertura realizada na viga com extensômetro colado na armadura



Figura 53: Ligação do extensômetro das armaduras com o cabo de aquisição de dados

Cabe ressaltar que as armaduras das vigas corroídas, sem recuperação, não foram instrumentadas. A decisão baseou-se na consideração da elevada degradação do concreto, devido ao processo corrosivo, procurando evitar maiores danos frente a necessidade que haveria de abertura no concreto para a exposição das armaduras.

### 3.9.2.6 Deformação específica do UHPFRC

Determinou-se a deformação específica do UHPFRC através de medição com extensômetros (*strain gages*). Para todas as vigas ensaiadas, foram utilizados *strain gages*, marca KYOWA, com 20 mm de comprimento, resistência de 120 ohms e *gauge factor* de 2,11. Os extensômetros para aferição da deformação do concreto foram fixados na face inferior à seção central da viga. A instalação do extensômetro no UHPFRC foi realizada seguindo o procedimento aplicado na instalação destes no concreto. A sequência deste procedimento é mostrada na Figura 54.

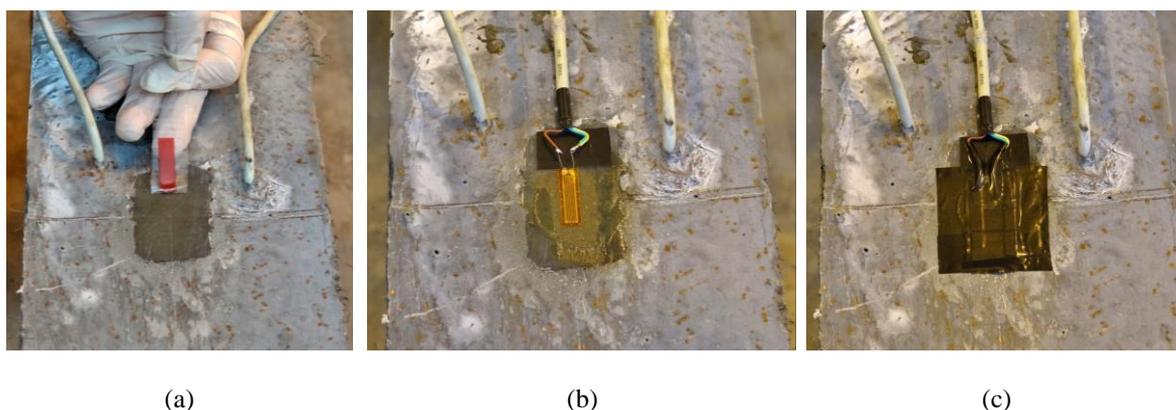


Figura 54: Instalação do extensômetro no UHPFRC: posicionamento (a), solda no cabo de aquisição de dados (b) e, proteção do extensômetro (c)

### 3.9.2.7 Deformação específica do Concreto Têxtil

Mediu-se a deformação específica do Concreto Têxtil, também com o uso de extensômetros (*strain gages*), neste caso, fixados na malha têxtil. Para todas as vigas ensaiadas, *strain gages*, marca KYOWA, específicos para aplicação em materiais compósitos, com 5 mm de comprimento, resistência de 120 ohms e *gauge factor* de 2,09, foram utilizados. Os extensômetros foram fixados no urdume central da malha do têxtil, no meio do comprimento da malha. A fixação do extensômetro – (Figura 55 (a)) – iniciou pelo preparo da superfície do urdume. Para a fixação do extensômetro utilizou-se um adesivo de contato instantâneo para

superfícies flexíveis. O extensômetro colado sobre o filamento central da malha têxtil é mostrado na Figura 55 (b).

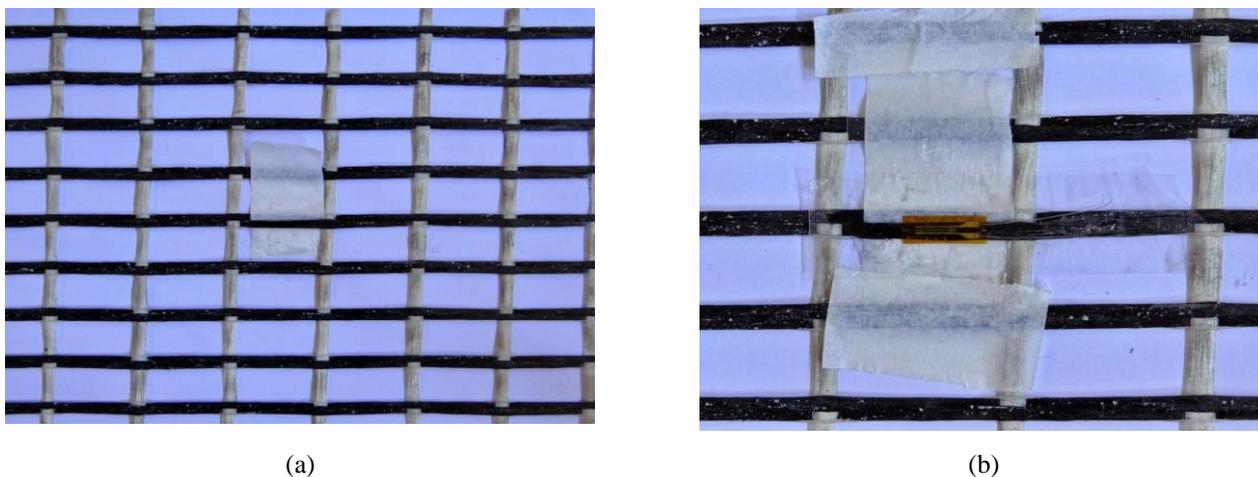


Figura 55: Instalação do extensômetro na malha têxtil: separação do filamento central (a) e, extensômetro colado sobre o filamento central

Desejando-se a menor interferência possível no desempenho do reforço, devido à instalação do extensômetro, utilizou-se fios de cobre revestidos como ponte para instalação dos cabos de transmissão de dados – Figura 56 (a). Os fios foram posicionados na tela com fita isolante e soldados ao extensômetro. A solda e o extensômetro foram protegidos com fita isolante e uma camada de poliuretano, as extremidades livres dos fios ficaram expostas – Figura 56 (b) – e conectadas ao cabo de transmissão de dados após a execução do reforço.

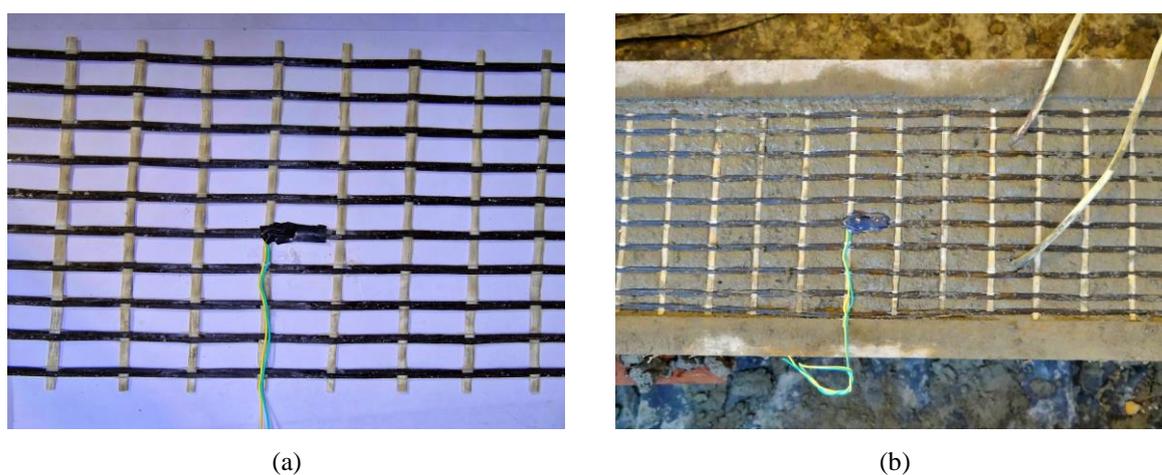


Figura 56: Instalação do extensômetro na malha têxtil: ponte de ligação entre o extensômetro e o cabo de aquisição de dados (a) e, posicionamento da ponte de ligação após execução da recuperação (b)

### 3.10 AVALIAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO

Após o ensaio de flexão, foram retiradas as armaduras das vigas, conforme seguimento ilustrado na Figura 57. Optou-se pela região junto ao apoio para evitar os efeitos de alongamento da armadura na seção de momento fletor máximo (terço médio). Foram retiradas armaduras de todas as vigas, incluindo as sem processo corrosivo, que serviram de referência para a determinação do grau de corrosão.

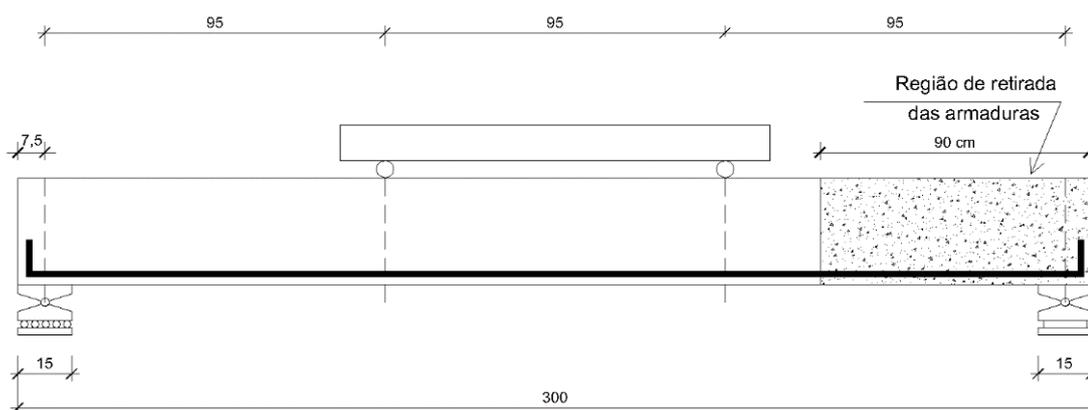


Figura 57: Região de retirada das armaduras da viga, distâncias em centímetros

Removidas às armaduras das vigas, retirou-se o concreto aderido às barras. Em seguida, as armaduras foram imersas numa solução de 3,5 g de hexametileno tetramina diluídos em uma solução de ácido clorídrico (500 ml) e água destilada (500 ml). Este procedimento é normatizado pela ASTM G1-03 (ASTM, 2017). As barras eram mantidas na solução por 40 minutos para remoção dos produtos de corrosão. Após, foram limpas em água corrente para retirar o ácido clorídrico.

Subsequentemente à limpeza, as barras foram transferidas para uma estufa. Mantidas à temperatura de 30°C, lá permaneceram até a total remoção de umidade. Na sequência foram aferidos a massa e o comprimento de cada uma delas, determinando da massa linear. O grau de corrosão, expresso em perda de massa, foi determinado de acordo com a Equação 22. A massa linear de referência foi considerada como a média das armaduras sem corrosão.

Equação 22

$$GC = \frac{(m_{ref} - m_{cor})}{m_{cor}} \times 100$$

Onde,

$GC$  = grau de corrosão, expresso em perda de massa;  
 $m_{ref}$  = média da massa linear das armaduras não corroídas;  
 $m_{cor}$  = massa linear individual a armadura corroída.

O parâmetro calculado pela Equação 22 é o valor real da corrosão das armaduras das vigas corroídas. No próximo capítulo, são feitas comparações dos resultados da avaliação experimental.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo do programa experimental. Os valores, além de apresentados, são discutidos para subsidiar as conclusões da pesquisa, descritas no capítulo final deste trabalho. Inicialmente, são apresentados os resultados relativos às propriedades dos materiais aplicados neste estudo. Na sequência, os que dizem respeito à aceleração da corrosão, comparando os valores teóricos e efetivos (reais), seguindo-se uma análise da corrosão por ensaios não destrutivos. Os efeitos da corrosão no comportamento à flexão de vigas de concreto armado e as técnicas de recuperação da corrosão, propostas nesta tese, são avaliados.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As propriedades dos materiais empregados no desenvolvimento da pesquisa – concreto, armadura, UHPFRC e Concreto Têxtil – são apresentadas nos itens seguintes.

#### 4.1.1 Concreto

A caracterização do concreto empregado na confecção das vigas, foi realizada para determinar suas propriedades quando endurecido. Os parâmetros aferidos foram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade à compressão. Os ensaios ocorreram nas idades normatizadas e nas correspondentes às rupturas das vigas.

##### 4.1.1.1 Concreto: resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada para as idades de 7, 28 e 91 dias para cada concretagem realizada e, também, avaliada nas idades correspondentes às rupturas das vigas de concreto armado. As rupturas das vigas foi dividida em dois grupos: grupo 1 – vigas testemunhos (sem corrosão) e corroídas; grupo 2 – vigas recuperadas. Para a determinação da resistência à compressão, seguiu-se as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para o grupo 1, a idade de ruptura das vigas ficou compreendida entre 498 e 510 dias. Assim, definiu-se, a idade de 502 dias, como média. A determinação da resistência à compressão foi realizada considerando-se o intervalo de variação previsto pela NBR 5739 (ABNT, 2018), de 11 dias, para a idade de 502 dias. Desta forma, adotando o intervalo de variação, a resistência

à compressão pode ser avaliada para a idade de 502 dias com tolerância de  $\pm 11$  dias para a ruptura dos corpos de prova.

Para o grupo 2, a idade de ruptura das vigas ficou compreendida entre 665 e 679 dias. Considerou-se, assim, como média, a idade de 672 dias. Como o intervalo previsto pela NBR 5739 (ABNT, 2018) é de 15 dias, a resistência à compressão para as diferentes concretagens é expressa para a idade de 672 dias.

A avaliação utilizou três corpos de prova para cada situação de ensaio. Os resultados da média e o desvio padrão dos valores da resistência à compressão estão apresentados na Tabela 1, relacionando as diferentes concretagens e a idade de ruptura.

Tabela 1: Resistência à compressão para as diferentes concretagens e a idade de ruptura

Idade	7 dias		28 dias		91 dias		502 dias		672 dias	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	26,23	1,55	32,00	0,87	32,59	0,40	33,14	0,24	33,31	0,46
2	27,24	0,81	33,27	0,72	33,70	0,80	34,01	0,88	33,92	0,85
3	22,11	2,84	29,62	1,76	30,70	1,45	31,36	0,96	31,35	0,72
4	27,29	0,69	31,74	0,31	32,58	0,36	32,88	1,66	32,93	1,84
5	26,63	0,66	29,17	0,62	29,97	0,60	31,49	0,44	31,50	0,59
6	24,09	1,34	28,97	0,68	30,79	0,52	31,40	0,69	31,60	0,75
Média	25,60	2,33	30,80	1,85	31,72	1,50	32,38	1,31	32,44	1,31

Para avaliar, estatisticamente, os resultados, verificando se há diferenças significativas entre os valores de resistência à compressão para as diferentes concretagens, utilizou-se o método estatístico de Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA tem a finalidade de identificar se a diferença das médias, entre grupos de dados, é significativamente maior que a o erro amostral. O método estatístico avalia se há diferenças significativas entre as médias dos grupos, verificando se há influência, ou não, na variável de resposta. Para a análise estatística, utilizou-se o software Statistica 13.5. O resultado da análise de variância, ANOVA, dos valores de resistência à compressão, é apresentado na Tabela 2, na qual se observou que a idade e a concretagem exerceram diferenças significativas na resistência à compressão.

Tabela 2: Análise de variância para os valores de resistência à compressão

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Concretagem	143,29	5	28,66	25,46	0,00	S
Idade	591,13	4	147,78	131,31	0,00	S
Concretagem x Idade	36,33	20	1,82	1,61	7,90	NS
Erro	67,53	60	1,13			

\* Para um nível de confiança de 95%  
S – significativo NS – não significativo

Pela análise, observa-se que a idade exerceu influência nos valores da resistência à compressão, como esperado, tendo em vista que se sabe que há acréscimo da resistência do concreto com o aumento da idade. A elevação da resistência à compressão, conforme previsto, é mais acentuada para as idades iniciais (até 28 dias) e, após, há uma tendência de estabilização do valor, com o passar do tempo (Figura 58).

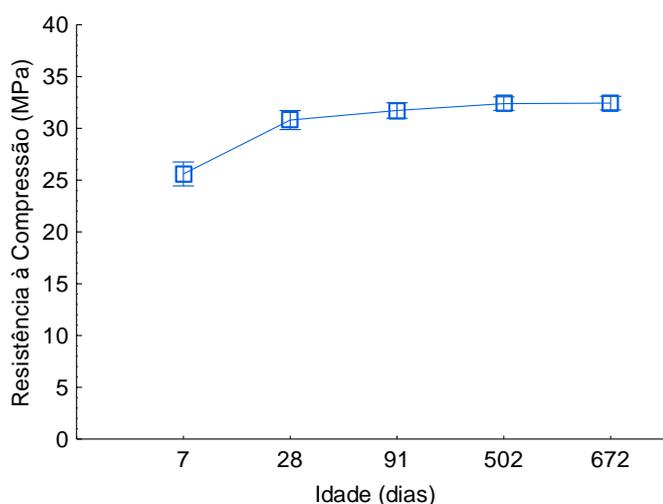


Figura 58: Resistência à compressão média

Além da influência significativa da idade na resistência à compressão, observou-se que houve diferenças em relação às concretagens. Analisando-se a interação entre idade e concretagem, a concretagem não exerceu influência significativa na resistência à compressão. Portanto, não é possível concluir que há uma associação, estatisticamente significativa, entre a idade e a concretagem. Assim, não havendo esse tipo de relação a resistência à compressão pode ser analisada independentemente da concretagem em diferentes idades.

Desta maneira, não foi considerada a existência de diferenças na resistência à compressão das vigas, em função das diferentes concretagens, nas idades de ruptura de 502 e 672 dias. Isto

possibilita a determinação da resistência à compressão do concreto através da média das diferentes concretagens nas idades de rupturas das vigas. Obteve-se o valor de 32,4 MPa.

#### 4.1.1.2 Concreto: módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade à compressão, seguiu-se as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2017). O módulo de elasticidade foi determinado para as idades de 28, 502 e 672 dias para cada concretagem realizada.

Três corpos de prova, para cada idade, foram ensaiados. As deformações específicas foram avaliadas com uso de LVDTs da marca HBM, com curso de  $\pm 1,00$  mm, precisão de 0,0001 mm, empregando o sistema de aquisição de dados descrito no item 3.9.2.1. Os resultados, média e o desvio padrão, do módulo de elasticidade à compressão estão apresentados na Tabela 3, relacionando as diferentes concretagens e a idade de ruptura.

Tabela 3: Módulo de elasticidade à compressão para as diferentes concretagens e a idades de ruptura

Idade	28 dias		502 dias		672 dias	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	36,76	0,78	37,36	1,49	37,39	1,24
2	33,05	0,74	34,01	0,93	33,99	2,53
3	32,39	0,66	34,65	0,65	34,61	0,26
4	32,86	1,53	34,15	1,16	33,70	1,59
5	33,23	1,72	35,16	1,34	35,79	1,60
6	30,51	0,39	31,16	0,40	31,76	0,49
Média	33,13	2,11	34,41	2,09	34,54	2,19

Com objetivo de avaliar estatisticamente os resultados, estes foram, também, como a resistência a compressão, analisados pelo método estatístico de Análise de Variância (ANOVA). O resultado para o módulo de elasticidade é apresentado na Tabela 4, na qual se observa que a concretagem e a idade exerceram diferenças significativas no módulo de elasticidade, assim como ocorreu na análise relativa à resistência à compressão.

Tabela 4: Análise de variância para o módulo de elasticidade

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Concretagem	158,94	5	31,784	22,76	0,00	S
Idade	20,47	2	10,235	7,33	0,00	S
Concretagem x Idade	7,90	10	0,7901	0,57	83,05	NS
Erro	50,28	36	1,3965			

\* Para um nível de confiança de 95%  
S – significativo NS – não significativo

Constatadas as influências significativas da idade e das concretagens no módulo de elasticidade, observou-se que um baixo desvio padrão foi determinado entre as situações de ensaio, podendo ser a causa deste resultado. Entretanto, não é possível concluir que há uma associação, estatisticamente significativa, entre a concretagem e a idade. Deste modo, para diferentes idades não há diferenças estatísticas entre as concretagens, logo, o módulo de elasticidade pode ser analisado independentemente da concretagem em diferentes idades.

Feita esta análise, não foram consideradas diferenças no módulo de elasticidade das vigas, em função das diferentes concretagens, nas idades de ruptura de 502 e 672 dias. Adotou-se, como valor para o módulo de elasticidade do concreto, a média dos valores obtidos nas diferentes concretagens nas idades de ruptura das vigas, ou seja, 34,8 GPa.

#### 4.1.2 Armaduras

O aço utilizado foi CA-50 para as armaduras positiva e negativa. Para a armadura positiva, com diâmetro de 12,5 mm, obteve-se tensões de escoamento média de 670 MPa e de ruptura de 770 MPa. A armadura negativa, utilizando diâmetro de 6,3 mm, apresentou as seguintes tensões: de escoamento média de 650 MPa e de ruptura de 765 MPa.

#### 4.1.3 UHPFRC

A caracterização do UHPFRC, utilizado na recuperação das vigas, foi realizada para determinar as propriedades tanto no estado fresco quanto no endurecido. Para a avaliação no estado fresco foi aferido o espalhamento, através do índice de consistência, de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2002). Os resultados obtidos para as quatro concretagens ficaram compreendidos na faixa de  $300 \pm 20$  mm.

No estado endurecido, determinou-se a resistência à compressão e o módulo de elasticidade aos 28 dias e, também, nas idades de ruptura das vigas recuperadas, considerando a tolerância prevista pela NBR 5739 (ABNT, 2018). As rupturas das vigas recuperadas ocorreu, de forma planejada, para a idade de 27 a 29 dias, contados a partir da execução da recuperação com UHPFRC.

##### 4.1.3.1 UHPFRC: resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão, seguiu-se as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018). Utilizou-se, portanto, corpos de prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de

altura, visto que não há presença de agregados graúdos no UHPFRC. Foram avaliados cinco corpos de prova para cada determinação. Os resultados da resistência à compressão, para a idade de 28 dias, estão apresentados na Tabela 5, para as vigas recuperadas com UHPFRC.

Tabela 5: Resistência à compressão do UHPFRC para as diferentes vigas recuperadas

Viga	Resistência à compressão		
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente variação (%)
COR-10-UHPFRC-V1	145,39	11,16	7,7%
COR-10-UHPFRC-V2	133,22	3,40	2,6%
COR-15-UHPFRC-V1	135,16	9,39	6,9%
COR-15-UHPFRC-V2	136,70	3,28	2,4%
Média	137,62	8,15	5,9%

Os valores foram avaliados estatisticamente pelo método estatístico de Análise de Variância (ANOVA). Os resultados da análise estão apresentados na Tabela 6 na qual observou-se que não houve diferenças significativas na resistência à compressão do UHPFRC para as diferentes vigas recuperadas.

Tabela 6: Análise de variância para a resistência à compressão do UHPFRC

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Viga	259,7	3	86,6	1,473	29,34	NS
Erro	470,2	8	58,8			

\* Para um nível de confiança de 95%  
S – significativo NS – não significativo

Portanto, a resistência à compressão do UHPFRC, aos 28 dias, foi considerada igual a média dos valores obtidos nas diferentes vigas recuperadas, obtendo-se o valor de 137,6 MPa. Na definição do programa experimental o valor pretendido era de 140 MPa, logo a média resultou num valor próximo ao inicialmente estipulado.

#### 4.1.3.2 UHPFRC: módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade à compressão seguiu as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2017), porém foram utilizados corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, devido a limitação do suporte para a fixação dos LVDTs. Quanto à moldagem e a preparação das bases dos corpos de prova, as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2018) serviram de referência. Foram avaliados três corpos de prova para cada determinação. Os

resultados da módulo de elasticidade, para a idade de 28 dias, estão apresentados na Tabela 7, para as vigas recuperadas com UHPFRC.

Tabela 7: Módulo de elasticidade do UHPFRC para as diferentes vigas recuperadas

Viga	Módulo de Elasticidade		
	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente variação (%)
COR-10-UHPFRC-V1	47,78	0,75	1,57%
COR-10-UHPFRC-V2	48,78	0,22	0,45%
COR-15-UHPFRC-V1	48,49	0,66	1,36%
COR-15-UHPFRC-V2	49,01	0,38	0,78%
Média	48,51	0,67	1,39%

Os resultados foram avaliados pelo método estatístico de Análise de Variância (ANOVA). Observa-se, na Tabela 8, que não houve diferenças significativas no módulo de elasticidade do UHPFRC para as diferentes vigas recuperadas.

Tabela 8: Análise de variância para o módulo de elasticidade do UHPFRC

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Viga	2,59	3	0,86	2,91	10,12	NS
Erro	2,38	8	0,3			

\* Para um nível de confiança de 95%  
S – significativo NS – não significativo

Portanto, o módulo de elasticidade do UHPFRC, aos 28 dias, foi considerado igual a média das diferentes vigas recuperadas, obtendo-se o valor de 48,5 GPa.

#### 4.1.4 Concreto Têxtil

O Concreto Têxtil, como já descrito, é um material formado por uma malha têxtil e uma matriz cimentícia. As características e propriedades da malha têxtil foram apresentadas no item 3.2.3.2, utilizando os valores apresentados pelo fabricante. Como matriz cimentícia foi selecionada uma argamassa. A caracterização desta argamassa foi realizada determinando-se as propriedades no estado fresco e no endurecido. Para a avaliação no estado fresco foi utilizado o método normatizado pela NBR 7215 (ABNT, 1997), através do índice de consistência. Os resultados obtidos para as quatro recuperações ficaram compreendidos na faixa de  $220 \pm 10$  mm.

A ruptura das vigas reforçadas com Concreto Têxtil foi realizada após oito dias da execução dos reforços. O intervalo de tempo foi definido por questões logísticas, do ensaio de flexão das vigas recuperadas, entretanto foi baseado nas análises realizadas por Giese (2019) que verificou

que a idade de ruptura do reforço em Concreto Têxtil não apresentou influência significativa na capacidade resistente das vigas reforçadas. Desta forma, no estado endurecido, foram determinadas as resistências à compressão e à tração na flexão para a idade de 28 dias. Registra-se que, na idade de ruptura das vigas, não foram determinados os valores dos parâmetros da argamassa devido à logística e uso do equipamento para a ruptura das vigas.

#### 4.1.4.1 Concreto Têxtil: resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão, seguiu-se as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1997), com corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Foram avaliados três corpos de prova para cada determinação de valores. Os resultados da resistência à compressão, para a idade de 28 dias, estão apresentados na Tabela 9, para as vigas recuperadas com concreto têxtil.

Tabela 9: Resistência à compressão da argamassa aos 28 dias para as diferentes vigas recuperadas

Viga	NBR 7215 (ABNT, 1997)		
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente variação (%)
COR-10-TEXTIL-V1	65,26	2,37	3,63%
COR-10-TEXTIL-V2	67,80	3,34	4,93%
COR-15-TEXTIL-V1	63,59	1,82	2,86%
COR-15-TEXTIL-V2	65,27	3,06	4,69%
Média	65,48	2,80	4,27%

Os valores obtidos foram avaliados pelo método estatístico de Análise de Variância (ANOVA). Os resultados desta análise estão na Tabela 10, na qual se observa que não houve diferenças significativas na resistência à compressão da argamassa para as diferentes vigas recuperadas. Portanto, a resistência à compressão da argamassa do Concreto Têxtil, aos 28 dias, teve seu valor considerado igual à média dos obtidos para as diferentes vigas recuperadas: 65,5 MPa.

Tabela 10: Análise de variância para a resistência à compressão da argamassa

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Viga	27,15	3	9,05	1,229	36,08	NS
Erro	58,90	8	7,36			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

#### 4.1.4.2 Concreto Têxtil: resistência à tração por flexão

Para a determinação da resistência à tração na flexão, seguiram-se as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram usados corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm de lado e 160 mm de comprimento. Foram avaliados três corpos de prova para cada determinação e os resultados, para a idade de 28 dias, estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resistência à tração na flexão da argamassa aos 28 dias para as diferentes vigas recuperadas

Viga	NBR 13279 (ABNT, 2005)		
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente variação (%)
COR-10-TEXTIL-V1	4,63	0,15	3,34%
COR-10-TEXTIL-V2	4,43	0,45	10,21%
COR-15-TEXTIL-V1	4,28	0,25	5,92%
COR-15-TEXTIL-V2	4,44	0,09	2,02%
Média	4,44	0,27	6,04%

Assim como para os demais parâmetros, os resultados da resistência à tração na flexão da argamassa foram analisados pelo método estatístico de Análise de Variância (ANOVA) e são apresentados na Tabela 12. Nesta análise de variância, observou-se que não houve diferenças significativas na resistência à tração na flexão da argamassa para as diferentes vigas recuperadas. Feita esta constatação, a resistência à tração na flexão da argamassa do Concreto Têxtil, aos 28 dias, foi considerada como sendo igual a média das diferentes vigas recuperadas, ou seja, 4,44 MPa.

Tabela 12: Análise de variância para a resistência à tração na flexão da argamassa

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Viga	0,191	3	0,0637	0,850	50,46	NS
Erro	0,6	8	0,075			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

## 4.2 CORROSÃO ACELERADA

É importante destacar que, em processos de corrosão, são frequentes as variações, quando comparados valores pretendidos de corrosão (teóricos) e os efetivos (reais), Diversos autores descrevem esta constatação (ADAMATTI, 2016; CAETANO, 2008; GRAEFF, 2007; STEIN, 2019). Outro ponto importante diz respeito à avaliação efetiva da corrosão que, geralmente, é realizada no encerramento do programa experimental.

Nesse estudo, os efeitos da corrosão foram avaliados em termos de perda de massa da armadura. A escolha deu-se por ser um parâmetro comumente utilizado em estudos de corrosão acelerada em estruturas de concreto armado (ADAMATTI, 2016; APOSTOLOPOULOS, 2007; CAETANO, 2008; GRAEFF, 2007; KANCHANA DEVI *et al.*, 2017; STEIN, 2019).

#### 4.2.1 Corrosão acelerada: corrosão teórica

A corrosão acelerada foi realizada com os parâmetros e metodologia apresentados no item 3.4. Durante a realização da aceleração, observou-se, para todas as vigas que passaram pelo processo de corrosão, o comportamento, descrito a seguir, também constatado por Stein (2019) em seu estudo. Acompanhando-se o processo de corrosão, que utilizou a formação de um circuito elétrico entre a solução e o eletrodo de corrosão, alimentado com corrente constante, foi verificado que esta não permanecia constante. A corrente diminuía logo no início do processo de aceleração (entre 3 e 5 dias) e, após um período (de 1 a 2 dias), a corrente voltava para seu patamar inicial e seguia constante ao longo do ensaio de aceleração da corrosão.

Este comportamento pode estar relacionado com a cinética do processo corrosivo, em que há, primeiramente, um período da iniciação da corrosão, seguido de período de propagação da corrosão. No período de iniciação, a corrosão é muito afetada pela concentração de cloretos, pela porosidade e pelo cobrimento do concreto. A iniciação ocorre até uma concentração crítica de cloreto, gerando a despassivação do aço. Após atingir a concentração crítica, é iniciada a propagação da corrosão. O desenvolvimento da propagação da corrosão está ilustrado na Figura 59.

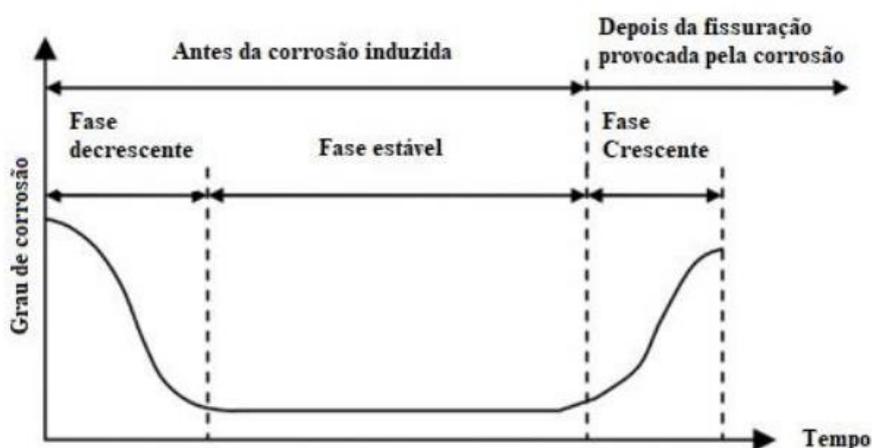


Figura 59: Período de propagação da corrosão

(Fonte: Yuan *et al.*, 2009, adaptado por Stein, 2019)

Logo no início da propagação, há a formação de camadas de produtos expansivos que ocupam os poros do concreto, retardando o transporte de oxigênio e umidade (fase decrescente). Nesta etapa, ocorre a redução da corrente aplicada e, conseqüentemente, da taxa de corrosão. A corrente permanece estabilizada (fase estável) até o início da fissuração do concreto, promovida pelo acúmulo de produtos de corrosão. Este fenômeno gera novos meios para o transporte de umidade e oxigênio, acelerando a penetração de íons cloreto e aumentando novamente a taxa de corrosão e, por consequência, a corrente elétrica (fase crescente). Após a fissuração, ocorre a reação em cadeia do processo corrosivo, quando são formados mais produtos expansivos, aumentando a fissuração, o transporte de oxigênio e a umidade, desenvolvendo, sucessivamente, essa cinética do processo corrosivo. É nesta etapa que a corrente permanece, novamente, estável (HÁJKOVÁ *et al.*, 2018; GAO *et al.*, 2019; STEIN, 2019).

Conforme relatado por Stein (2019), também, observou-se a redução da corrente na fase inicial da aceleração da corrosão. A corrente aplicada, inicialmente, de 1,94 A permaneceu constante durante os primeiros dias de aceleração da corrosão. No terceiro dia, aproximadamente, houve a redução da corrente aplicada, devido à formação inicial dos produtos de corrosão, ocasionando a obstrução do fluxo de oxigênio, de umidade e de íons cloretos. Após a formação de microfissuras, restabeleceu-se o fluxo e a corrente retornou para seu patamar inicial de 1,94 A, mantendo-se constante até o final do processo de aceleração.

Como já descrito no item 3.4, a corrosão foi obtida correlacionando o tempo necessário para obter a perda de massa para os respectivos graus de corrosão 5%, 10% e 15%. Para a aferição da perda de massa foi aplicada a Equação 2, controlando a perda de massa através da corrente aplicada.

Inicialmente, devido à redução da corrente pela colmatação dos poros do concreto, a corrente foi aferida em intervalos de 8 horas. Quando a corrente restabeleceu seu valor ao patamar inicial, o intervalo de controle passou para interstícios de 24 horas. A aceleração da corrosão era interrompida quando a perda de massa era atingida. A perda de massa necessária para cada grau de corrosão está apresentada na Tabela 13, relacionando a perda de massa teórica (determinada conforme Equação 2) e o grau de corrosão teórico calculado para cada uma das vigas.

Tabela 13: Grau de corrosão teórico das vigas corroídas

Viga	Grau de Corrosão	Perda de massa necessária (g)	Perda de massa teórica (g)	Grau de corrosão teórico*
COR-5-V1	5 %	390	392	5,03%
COR-5-V2			397	5,09%
COR-10-V1	10 %	780	793	10,17%
COR-10-V2			791	10,14%
COR-10-TEXTIL-V1			786	10,08%
COR-10-TEXTIL-V2			790	10,13%
COR-10-UHPFRC-V1			792	10,15%
COR-10-UHPFRC-V2			798	10,23%
COR-15-V1	15 %	1.170	1221	15,65%
COR-15-V2			1206	15,46%
COR-15-TEXTIL-V1			1207	15,47%
COR-15-TEXTIL-V2			1219	15,63%
COR-15-UHPFRC-V1			1247	15,99%
COR-15-UHPFRC-V2			1239	15,88%

\* referente à massa inicial de 7.800 g

#### 4.2.2 Corrosão acelerada: corrosão real

Após a ruptura das vigas à flexão, foram extraídas as duas barras da armadura longitudinal de cada viga para a determinação do grau de corrosão real. Cabe destacar que não se utilizou o segmento central das armaduras, devido ao escoamento do aço nessa região. O procedimento seguiu as orientações da ASTM G1-03 (ASTM, 2017).

Em vista das possíveis variações entre a corrosão teórica e a efetiva, nas avaliações dos resultados ao longo da análise, os valores da corrosão foram adotados dentro de uma faixa de variação. As faixas adotadas referem-se à avaliação efetiva da corrosão. As porcentagens de perda de massa foram determinadas com os valores médios, sendo que para cada viga foram avaliadas duas barras de armadura. Na Tabela 14, é mostrado o grau de corrosão real para cada uma das vigas.

De acordo com a Tabela 14, observou-se que os valores reais de corrosão se aproximaram dos pretendidos na definição do programa experimental, ao se comparar com os valores médios obtidos para cada grupo de vigas corroídas. A exceção ocorreu para o nível de 5%, ficando com a corrosão real 1,27% abaixo do valor almejado. Esse comportamento pode ter influência da colmatação dos poros do concreto, que ocorre logo no início do processo de aceleração da

corrosão, e, portanto, há necessidade de adequação do tempo previsto para que esse nível de corrosão seja alcançado.

Tabela 14: Grau de corrosão real obtido experimentalmente em comparação aos valores teóricos

Viga	Grau de corrosão teórico	Grau de corrosão Real	Grau de Corrosão Médio	Grau de Corrosão Pretendido
COR-5-V1	5,03%	3,49%	3,73 %	5 %
COR-5-V2	5,09%	3,97%		
COR-10-V1	10,17%	9,97%	10,13 %	10 %
COR-10-V2	10,14%	10,13%		
COR-10-TEXTIL-V1	10,08%	8,61%		
COR-10-TEXTIL-V2	10,13%	10,20%		
COR-10-UHPFRC-V1	10,15%	10,66%		
COR-10-UHPFRC-V2	10,23%	11,22%		
COR-15-V1	15,65%	14,20%	14,03 %	15 %
COR-15-V2	15,46%	13,55%		
COR-15-TEXTIL-V1	15,47%	13,74%		
COR-15-TEXTIL-V2	15,63%	12,60%		
COR-15-UHPFRC-V1	15,99%	16,43%		
COR-15-UHPFRC-V2	15,88%	13,66%		

Para determinar a relação do grau de corrosão teórico com real, foi realizada uma análise do coeficiente de correlação de Pearson. Essa correlação avalia o grau de relação linear entre cada par de itens ou variáveis. Os valores de correlação podem estar entre -1 e +1, em que o sinal (+ ou -) indica se há uma correlação positiva (quando uma aumenta, a outra também aumenta) ou negativa (quando uma aumenta, a outra diminui) entre as variáveis. Entretanto, se o valor se aproxima de 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Para a análise da correlação de Pearson, utilizou-se o software Statistica 13.5. O resultado está apresentado na Tabela 15, para um intervalo de significância de 95%.

Tabela 15: Comparação entre a corrosão pretendida e a real pelo coeficiente de correlação de Pearson

Variável	Média	Desvio Padrão	Grau de Corrosão Pretendido
Grau de Corrosão Teórico	11,79%	3,83	1,0000
Grau de Corrosão Real	10,89%	3,94	0,8751

Conforme os valores da Tabela 15, observa-se que há uma correlação linear entre o grau de corrosão teórico e, o real de 0,8751. Significa que, com um intervalo de confiança de 95%, que é possível relacionar o grau de corrosão obtido teoricamente com o real. Essa relação está

ilustrada na Figura 60. Essa constatação indica que o procedimento de aceleração da corrosão, adotado nessa pesquisa, se apresentou adequado para a sua finalidade.

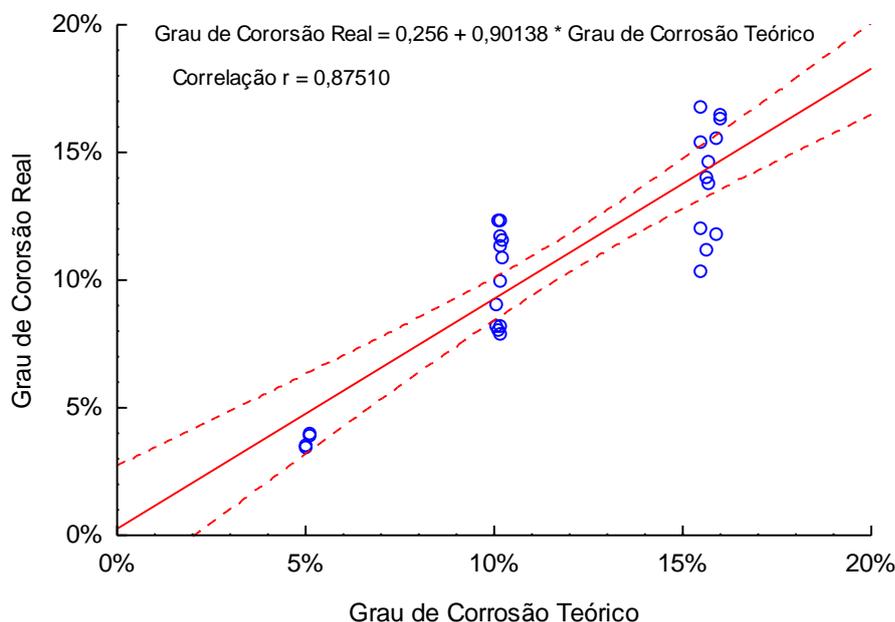


Figura 60: Correlação linear entre o grau de corrosão teórico e o grau de corrosão real

Na Tabela 14, apresentada anteriormente, os valores médios dos graus de corrosão real ficaram próximos tanto aos teóricos quanto aos definidos na concepção do programa experimental. Entretanto, é perceptível que houve variação entre os valores dos graus entre os grupos de corrosão (5, 10 e 15%). Por exemplo, para a corrosão pretendida de 10%, os valores variam entre 8,61% e 11,22%, obtendo-se uma média de 10,13%. Deste modo, a fim de avaliar estatisticamente os resultados, verificando se há diferenças significativas entre os grupos de corrosão e se eles podem ser tratados de forma individual foi realizada uma análise estatística. Seguindo no mesmo sentido, também foi avaliado o grau de corrosão real para cada grupo de vigas: as de referência; as recuperadas com Concreto Têxtil; e as recuperadas com UHPFRC. A análise estatística foi desenvolvida através da análise de variância, por meio do software Statistica 13.5. O resultado da análise de variância é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16: Análise de variância para o grau de corrosão real

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Grupo de Corrosão	0,027219	2	0,01360	40,392	0,00	S
Recuperação	0,001183	2	0,00059	1,7555	19,54	NS
Erro	0,00775	23	0,00034			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

Conforme os valores apresentados na Tabela 16, pode ser afirmado, com um intervalo de confiança de 95%, que há diferenças entre os grupos de corrosão (5, 10 e 15%): predefinidos no programa experimental e avaliados experimentalmente. Essa relação está no gráfico da Figura 61, no qual se observa a diferença entre os grupos de corrosão. Desta forma, para as análises dos efeitos do processo corrosivo, foram considerados os graus de corrosão representativos de cada um dos grupos (5%, 10% e 15%), podendo ser comparados separadamente, visto a diferença significativa entre eles. Desta forma não há possibilidade de comparação entre os grupos (5%, 10% e 15%), mas, somente, separadamente.

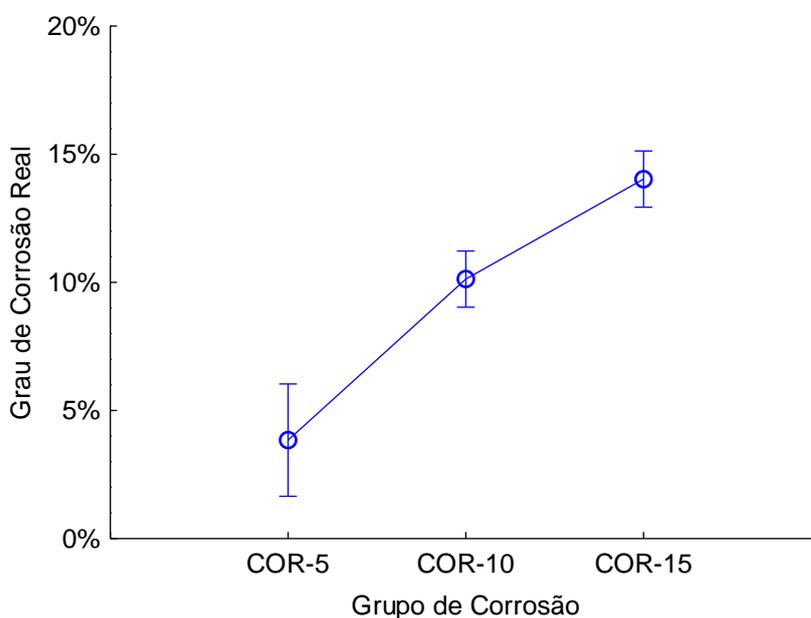


Figura 61: Grau de corrosão real obtido para cada grupo de corrosão

Em relação ao grau de corrosão real, em comparação ao procedimento de recuperação (referência, Concreto Têxtil e UHPFRC), através método estatístico de Análise de Variância (ANOVA), verificou-se que não há diferença significativa na comparação entre os parâmetros. Desta forma, para um mesmo nível de corrosão podem ser comparados os resultados entre as vigas corroídas sem recuperação e recuperadas pelos dois processos estudados. O resultado da análise de variância apresentado na Tabela 16, é representado na Figura 62: comparação do grau de corrosão real, para os diferentes procedimentos de recuperação, e para as vigas referência (sem recuperação).

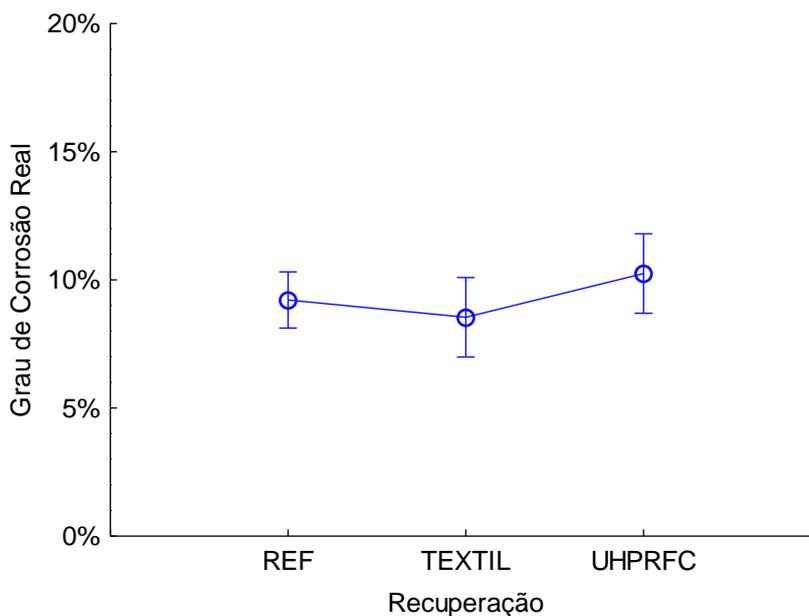


Figura 62: Grau de corrosão real obtido para procedimento de recuperação

Observa-se que não há variação do grau de corrosão para os diferentes procedimentos de recuperação, incluindo as vigas referências (sem recuperação). Além da avaliação do grau de corrosão real das armaduras, foi desenvolvido o diagnóstico da corrosão nas vigas de concreto armados através de ensaios não destrutivos.

### 4.3 DIAGNÓSTICO DA CORROSÃO POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

A avaliação da corrosão, através do diagnóstico por métodos não destrutivos, objetivou auxiliar na detecção da corrosão, por diferentes técnicas, nos distintos graus de intensidade. Essa etapa do desenvolvimento do estudo é relevante devido à associação dos valores obtidos, por cada técnica, com os graus de corrosão reais das vigas de concreto armado. O diagnóstico da corrosão foi realizado para as vigas sem processo de recuperação, utilizando os END de potencial de corrosão, resistividade e taxa de corrosão.

#### 4.3.1 Potencial de corrosão

A medida do potencial de corrosão é uma técnica qualitativa, amplamente utilizada, que oferece dados sobre a probabilidade de corrosão na armadura analisada. O procedimento do ensaio foi realizado de acordo com ASTM C-876 (ASTM, 2015). Os valores do potencial de corrosão, apresentados na Tabela 17, são a média para cada viga e o desvio padrão. São indicados,

também, estes parâmetros para cada nível de corrosão (grupos de vigas), relacionado com a probabilidade de corrosão.

Tabela 17: Média e desvio padrão do potencial de corrosão para as vigas corroídas e testemunhos

Grupo de Vigas	Viga	Média (mV)	Desvio (mV)	Média Grupo (mV)	Desvio Grupo (mV)	Probabilidade de Corrosão
COR-0	V1	28,84	7,45	-30,78	25,24	Menor que 10%
	V2	-90,40	43,03			
COR-5	V1	-298,22	21,34	-257,57	22,59	Incerta 50%
	V2	-216,92	23,85			
COR-10	V1	-240,96	17,95	-252,99	19,71	Incerta 50%
	V2	-265,03	21,47			
COR-15	V1	-494,11	32,94	-438,42	33,01	Maior que 90%
	V2	-382,72	33,08			

Como esperado, observou-se uma redução do potencial de corrosão conforme o nível de corrosão. Comparando os dados obtidos, com as faixas de valores da ASTM C-876 (ASTM, 2015), verificou-se que, para o grupo das vigas testemunhos (COR-0), a probabilidade de corrosão foi menor que 10%; para as vigas corroídas nos níveis de 5 e 10% (COR-5 e COR-10), foi incerta; e para o nível de 15% de corrosão (COR-15), foi maior que 90%.

Percebeu-se que houve uma incerteza na aferição da corrosão, utilizando a técnica do potencial de corrosão, para os níveis de 5 e 10%. Em ambos os níveis, o potencial de corrosão permaneceu dentro da mesma faixa de leitura e foram classificados com um probabilidade de 50% de haver corrosão. Entretanto, além de visualmente, foi constatado, pela avaliação da perda de massa das armaduras, a existência da corrosão.

Portanto, a avaliação da corrosão, através do potencial de corrosão, mostrou-se pouco eficaz para diagnosticar a corrosão para valores de até 10%, porém apresentou-se adequado para níveis de 15%. Desta forma, o ensaio de potencial de corrosão não apresenta resultados seguros, porém pode ser utilizado para este tipo de diagnóstico, desde que usado com cautela, visto que pode apresentar resultados potencialmente frágeis.

Além dos dados estatísticos do potencial de corrosão, apresentados na Tabela 17, foi realizado o mapeamento do potencial para cada uma das vigas. É apresentado na Figura 63. O mapeamento foi realizado através da elaboração de curvas hipsométricas, utilizando interpolação dos dados com a técnica da mínima curvatura. Segundo Andriotti (2009), trata-se de uma técnica de interpolação que utiliza um polinômio para gerar uma superfície que

minimiza sua curvatura, resultando em uma superfície suavizada, que passa através dos pontos amostrados, reproduzindo os valores da variável. A interpolação e a criação do mapeamento foi realizado com o software Surfer versão 19.2.213.

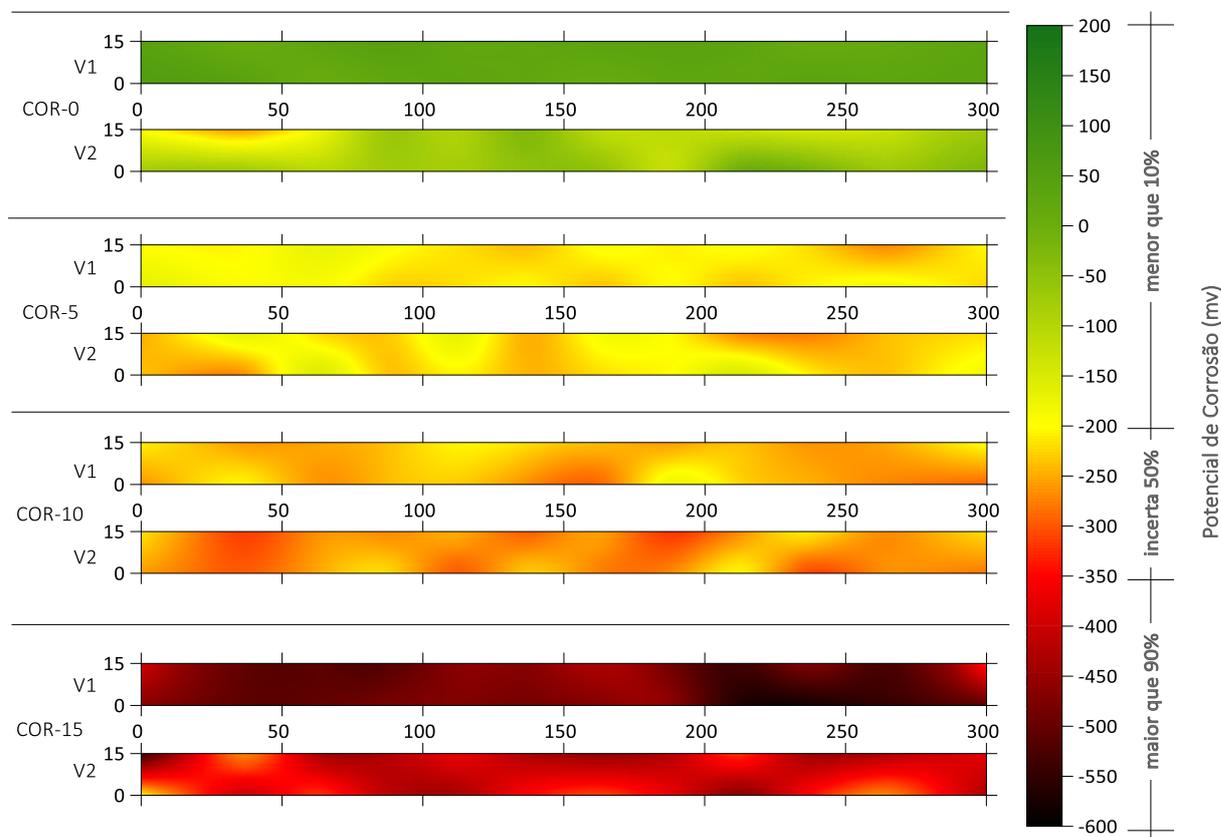


Figura 63: Mapeamento do potencial de corrosão, distâncias em centímetros

A escala utilizada foi baseada nos parâmetros da ASTM C-876 (ASTM, 2015), expressando o potencial de corrosão, em mV, relacionando-os com a probabilidade de corrosão. O mapeamento do potencial de corrosão – Figura 63 – proporciona a visualização global, ao invés de um parâmetro numérico. Desta forma, observou-se que o potencial foi uniforme, para cada uma das vigas analisadas, e se notou que também houve regularidade do potencial entre os grupos de vigas. Por fim, com este mapeamento se demonstra, graficamente, a alteração do potencial de corrosão de acordo com o seu nível, sendo que quanto maior o nível de corrosão, menor o seu potencial de corrosão.

#### 4.3.2 Resistividade

Para a avaliação da resistividade, foi aplicado o método do eletrodo externo, que determina este parâmetro entre o eletrodo e a barra de aço. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 18. São apresentados a média e o desvio padrão da resistividade para cada grupo de vigas e,

para cada nível de corrosão (grupos de vigas), é exposta a resistividade relacionando-a ao resultado da probabilidade de corrosão.

Tabela 18: Média e desvio padrão da resistividade para as vigas corroídas e testemunhos

Grupo de Vigas	Viga	Média ( $\Omega.m$ )	Desvio ( $\Omega.m$ )	Média Grupo ( $\Omega.m$ )	Desvio Grupo ( $\Omega.m$ )	Probabilidade de Corrosão
COR-0	V1	238,1	45,6	308,6	101,2	Desprezível
	V2	379,1	156,8			
COR-5	V1	16,7	8,7	12,4	7,0	Muito alta
	V2	8,2	5,3			
COR-10	V1	7,7	3,2	6,8	3,1	Muito alta
	V2	5,9	3,0			
COR-15	V1	4,8	2,1	4,0	1,8	Muito alta
	V2	3,3	1,5			

Como esperado, observou-se uma redução da resistividade conforme o aumento do nível de corrosão. Comparando os dados obtidos com as faixas de valores do CEB 192 (CEB,1988), verificou-se que, para o grupo das vigas testemunhos (COR-0), a probabilidade de corrosão foi desprezível e, para as corroídas (COR-5, COR-10 e COR-15), a probabilidade de corrosão é muito alta. Assim, diferentemente do potencial de corrosão, os resultados da avaliação da resistividade apresentaram-se coerentes em relação aos diferentes níveis de corrosão. Pode-se observar que a média da resistividade decaiu com o aumento do nível de corrosão.

O mapeamento da resistividade, para cada uma das vigas, está na Figura 64. O mapeamento, como no caso do potencial de corrosão, foi realizado através da elaboração de curvas hipsométricas, utilizando interpolação dos dados com a técnica da mínima curvatura através do software Surfer versão 19.2.213. A escala utilizada foi baseada nos parâmetros da CEB 192 (CEB, 1988), expressando a resistividade em  $\Omega.m$ , e relacionando-a à probabilidade de corrosão. O mapeamento – Figura 64, permite observar que a resistividade foi uniforme para cada uma das vigas analisadas. Notou-se, também, que há regularidade da resistividade entre os grupos de vigas corroídas e que, para todos os níveis de corrosão, estão dentro da faixa de alta probabilidade. Por fim, verifica-se que as vigas sem corrosão (COR-0) estão da faixa de resistividade maior que 200  $\Omega.m$ , indicando uma probabilidade desprezível de corrosão.

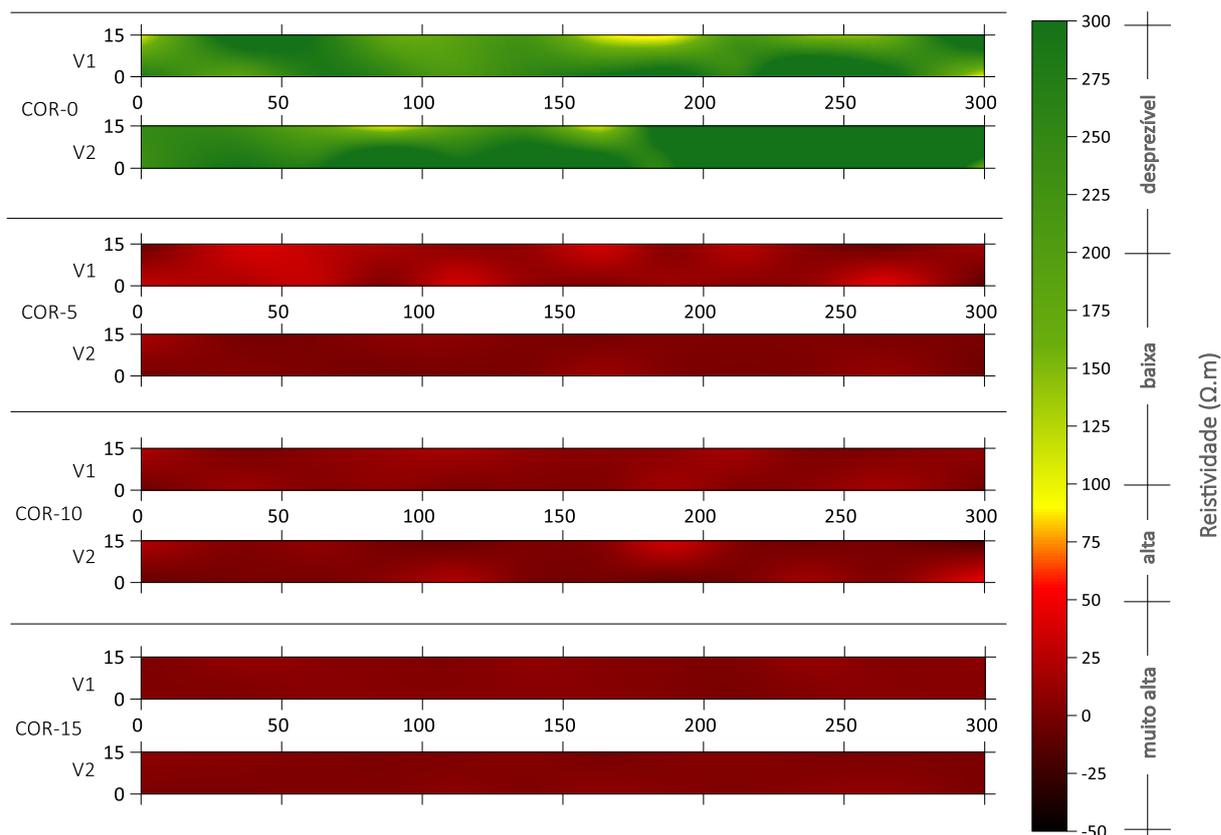


Figura 64: Mapeamento da resistividade, distâncias em centímetros

### 4.3.3 Taxa de corrosão

A taxa de corrosão foi determinada através da resistência à polarização. Através deste método, duas características relativas à corrosão podem ser obtidas: a densidade de corrente de corrosão instantânea ( $I_{corr}$ ) e a taxa de corrosão ( $V_{corr}$ ). A taxa de corrosão, também denominada velocidade de corrosão, é um parâmetro para aferição da perda da seção transversal da armadura em função do tempo. Como neste trabalho foi realizada a aceleração da corrosão, este parâmetro não foi utilizado devido à distorção do método de aceleração em relação ao fenômeno natural. Utilizou-se, para expressar a taxa de corrosão, a densidade de corrente de corrosão instantânea. A Tabela 19 apresenta os valores obtidos para a taxa de corrosão, para cada viga, apresentando-os por sua média e seu desvio padrão. Para cada nível de corrosão (grupos de vigas), também são apresentados as médias e o desvios padrões. Adicionalmente, são relacionadas as taxas de corrosão com os graus de corrosão.

Tabela 19: Média e desvio padrão da taxa de corrosão para as vigas corroídas e testemunhos

Grupo de Vigas	Viga	Média ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Desvio ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Média Grupo ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Desvio Grupo ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Grau de Corrosão
COR-0	V1	0,10	0,03	0,08	0,04	Desprezível
	V2	0,05	0,05			
COR-5	V1	0,86	0,78	1,41	1,12	Alto
	V2	1,96	1,45			
COR-10	V1	3,22	2,38	2,79	2,22	Alto
	V2	2,36	2,07			
COR-15	V1	9,83	4,49	10,04	5,93	Alto
	V2	10,25	7,37			

Observou-se, como esperado, uma relação positiva entre a taxa de corrosão e o nível de corrosão: aumentando um, o outro também aumentava. Comparando-se os resultados obtidos, com as faixas de valores do RILEM TC 154-EMC (ANDRADE *et al.*, 2004), verifica-se que, para o grupo das vigas testemunhos (COR-0), o grau de corrosão é desprezível, e, para as vigas corroídas (COR-5, COR-10 e COR-15), o grau de corrosão é classificado como muito alto. Do mesmo modo, como observado na avaliação da resistividade, a taxa de corrosão apresenta-se coerente em relação aos diferentes níveis de corrosão, indicando um grau de corrosão muito alto para as vigas submetidas à corrosão acelerada, independentemente, do nível desta aceleração.

Para a taxa de corrosão, foi elaborado, também, o mapeamento para cada uma das vigas e é apresentado na Figura 65. O mapeamento, como nos casos anteriores, foi realizado através da elaboração de curvas hipsométricas, utilizando interpolação dos dados com a técnica da mínima curvatura através do software Surfer versão 19.2.213. A escala utilizada foi baseada nos parâmetros do RILEM TC 154-EMC (ANDRADE *et al.*, 2004). Porém, para o valor máximo da escala, utilizou-se a maior taxa de corrosão obtida ( $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Esse valor foi adotado pois o valor máximo apresentado pelo RILEM TC 154-EMC é de apenas  $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (ANDRADE *et al.*, 2004). O mapeamento – Figura 65, permite observar que a taxa de corrosão aumentou gradativamente conforme o nível de aceleração da corrosão aplicado em cada viga. Verificou-se que as vigas sem corrosão (COR-0) ficaram dentro da faixa da taxa de corrosão menor que  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , indicando um grau de corrosão desprezível.

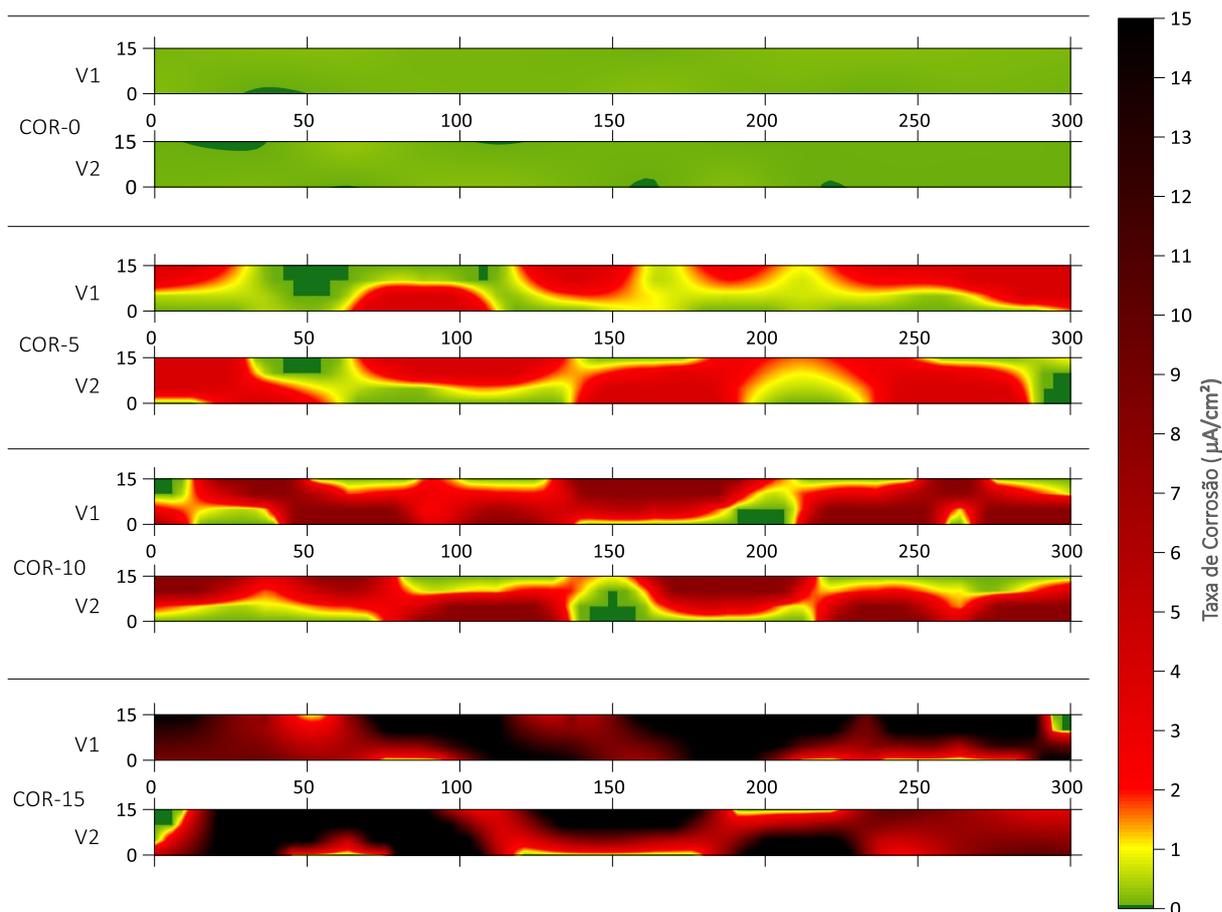


Figura 65: Mapeamento da taxa de corrosão, distâncias em centímetros

Avaliando as vigas com corrosão acelerada, todas ficaram com taxa de corrosão acima de  $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , indicando um grau de corrosão alto. Assim, como apresentado na Tabela 19, pelo mapeamento da taxa de corrosão é perceptível, de forma visual, que o aumento do nível de corrosão elevou gradativamente a taxa de corrosão. Verificou-se que entre as vigas do mesmo grupo há regularidade da taxa de corrosão. Desta forma, constata-se que o método de aceleração da corrosão proporcionou uma corrosão uniforme em ambas as vigas de cada grupo.

#### 4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS À FLEXÃO

A partir do comportamento experimental das vigas de concreto armado submetidas à flexão, considerando a existência do processo corrosivo, notoriamente, é possível confirmar os efeitos deletérios da corrosão no desempenho estrutural. A perda da capacidade resistente é evidente, chegando em níveis de redução de até 52,9%. Frente a estas perdas, a aplicação das duas técnicas de recuperação, com UHPFRC e com Concreto Têxtil, conduziram à reabilitação da capacidade estrutural de forma aceitável. Elevaram, em alguns casos, a resistência a níveis

superiores, chegando a um incremento de até 13,88%, quando comparados os valores experimentais em relação aos das vigas testemunhos. Na Tabela 20, são apresentados, em função dos níveis de corrosão, o procedimento de recuperação e as cargas de ruptura.

Tabela 20: Comparação entre cargas de ruptura à flexão

Identificação	Corrosão	Recuperação	Estimativa de Ruptura	Carga de ruptura	Variação*	
COR-0-V1	0%	-	89,3 kN	97,44 kN	-	
COR-0-V2				92,49 kN	-	
COR-5-V1	5%		76,8 kN	81,97 kN	-13,7 %	
COR-5-V2				88,11 kN	-7,2 %	
COR-10-V1	10%		65,4 kN	70,25 kN	-26,0 %	
COR-10-V2				67,23 kN	-29,2 %	
COR-10-UHPFRC-V1			UHPFRC	91,7 kN	89,11 kN	-6,2 %
COR-10-UHPFRC-V2				91,37 kN	-3,8 %	
COR-10-TÊXTIL-V1			Concreto Têxtil	91,0 kN	94,58 kN	-0,41%
COR-10-TÊXTIL-V2					97,67 kN	+2,77%
COR-15-V1	15%		-	55,7 kN	44,74 kN	-52,9 %
COR-15-V2					51,82 kN	-45,4 %
COR-15-UHPFRC-V1		UHPFRC	90,8 kN	89,67 kN	-5,6 %	
COR-15-UHPFRC-V2				85,87 kN	-9,9 %	
COR-15-TÊXTIL-V1		Concreto Têxtil	94,8 kN	104,11 kN	+8,78%	
COR-15-TÊXTIL-V2				110,24 kN	+13,86%	

\* Valores experimentais, comparados em relação a viga testemunho, sendo que valores negativos indicam redução e valores positivos indicam incremento

Devido à reduzida taxa de armadura, o modo de ruptura da viga testemunho é caracterizado pela deformação excessiva da armadura longitudinal. Neste caso, a ruptura da viga está associada a um quadro de fissuração elevado em conjunto com grandes deslocamentos verticais. Essas condições serviram de pressupostos para a determinação das características das vigas, justamente para avaliar a influência da corrosão também nessas características.

No decorrer, da análise dos resultados, foi realizada avaliação dos efeitos da corrosão em vigas de concreto armado, de forma pormenorizada, a fim de compreender os efeitos sobre o seu comportamento estrutural (item 4.5). Da mesma forma, foi avaliado o comportamento estrutural das vigas que receberam os procedimentos de recuperação propostos: com UHPFRC (item 4.6) e Concreto Têxtil (item 4.7).

#### 4.5 EFEITOS DA CORROSÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Para a compreensão mais detalhada dos efeitos da corrosão em vigas de concreto armado, foram realizadas análises sob diferentes perspectivas. Inicialmente, avaliou-se as decorrências relativas

a perda da capacidade resistente, tanto através da relação carga x deslocamento quanto dos modos de ruptura. A análise seguinte tratou de estudar a curva deformada da viga, através da avaliação dos deslocamentos e da ductilidade na flexão.

#### 4.5.1 Avaliação comportamento à flexão: carga x deslocamento

Em função da taxa de armadura reduzida, o modo de ruptura, das vigas testemunhos (sem corrosão), caracterizou-se pela deformação excessiva da armadura longitudinal e apresentou, portanto, maior concentração e abertura de fissuras no terço central da viga. As vigas testemunho COR-0-V1 e COR-0-V2, tiveram comportamentos compatíveis entre si e as cargas de ruptura atingidas foram coerentes com as cargas estimadas. O comportamento à flexão, na relação carga e deslocamento está ilustrada na Figura 66 (a): o deslocamento é central.

Quando se analisa a corrosão em níveis mais brandos, grau de corrosão de 5%, ocorre um pequeno decréscimo da carga de ruptura das vigas. O comportamento, ilustrado no gráfico da Figura 66 (b), corresponde as vigas COR-5-V1 e COR-5-V2, sendo comparado com as vigas testemunhos (linha COR-0) e com a estimativa de ruptura. A média das cargas últimas tem uma redução de 94,96 kN (COR-0) para 84,05 kN – decréscimo de 10,5% na capacidade portante das vigas corroídas. A média dos deslocamentos verticais das vigas testemunhos (COR-0), na ruptura, é de 36,20 mm. Por sua vez, a média destes mesmos deslocamentos, nas vigas COR-5-V1 e COR-5-V2, é de 32,11 mm, representando uma redução, nas vigas com corrosão, de 11,3%. Portanto, verifica-se que as vigas com corrosão de 5% apresentaram comportamento semelhante às vigas sem corrosão. Tal comportamento era o aguardado, visto que pequenas corrosões não provocam danos expressivos e podem inclusive melhorar a aderência. Cabe destacar que a média da corrosão real, das vigas do grupo 5% de corrosão, foi de 3,73%, e, portanto, o método de cálculo se mostra conservador, apresentando valores teóricos abaixo dos valores experimentais.

Ainda na Figura 66, é apresentado o comportamento à flexão das vigas corroídas com grau de corrosão de 10% – Figura 66 (c) e de 15% – Figura 66 (d), sendo comparadas com a vigas testemunhos (COR-0).

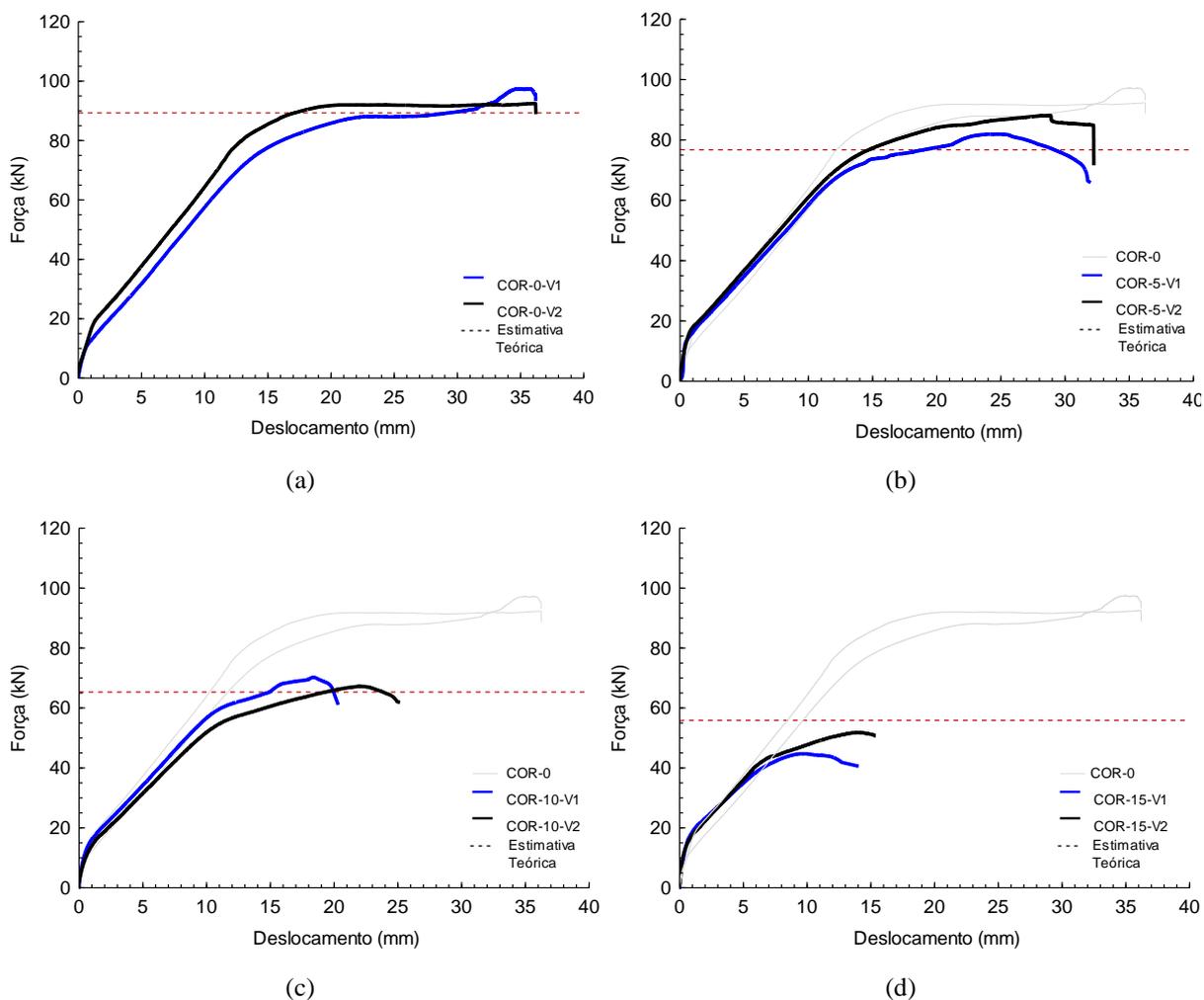


Figura 66: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas sem corrosão (a), vigas com 5% de corrosão (b), vigas com 10% de corrosão (c), e vigas com 15% de corrosão (d)

O grau de corrosão de 10% da armadura, nas vigas COR-10-V1 e COR-10-V2, influenciou de maneira considerável os valores da capacidade resistente e dos deslocamentos verticais. A Figura 66 (c) mostra o gráfico, que relaciona a carga e o deslocamento, das vigas COR-10 (V1 e V2) em comparação com as vigas testemunhos (COR-0) e a estimativa teórica dos valores. A média dos carregamentos últimos das vigas COR-10 (V1 e V2) foi de 68,74 kN, que em comparação com as vigas testemunhos, com 94,96 kN, significa um decréscimo de 27,6% na capacidade portante das vigas corroídas. O deslocamento vertical médio, na ruptura das vigas COR-10 (V1 e V2), foi de 22,75 mm, que comparado ao deslocamento das vigas testemunho (36,20 mm) representa uma queda de 37,2%.

A redução da carga última e, principalmente, do deslocamento vertical na ruptura, comprovam os comportamentos relatados por Castel, François e Arliguie (2000), Graeff (2007), Kanchana Devi *et al.*, (2017) e Stein (2019). Tal fato está associado com a intensificação do processo

corrosivo, promovido pela expansão dos produtos de corrosão. Neste caso, ocorre tanto a fissuração na camada de cobrimento do concreto quanto a perda de aderência entre o concreto e a armadura. Soma-se a isto a redução da seção transversal da armadura que afeta, significativamente, a capacidade de carga das vigas. Em relação à estimativa teórica, verifica-se que o método de cálculo se mostra adequado, apresentando valores teóricos próximo aos valores experimentais.

Do mesmo modo como foi observado para o caso da corrosão de 10%, porém de forma mais severa, o grau de corrosão de 15% gera uma grave redução da capacidade resistente e dos deslocamentos verticais. A Figura 66 (d) mostra o gráfico da relação entre carga e deslocamento, do valores das vigas COR-15-V1 e COR-15-V2, com corrosão de 15%, em comparação aos das vigas testemunhos (COR-0) e com a estimativa teórica de ruptura. A média dos carregamentos últimos das vigas COR-15 (V1 e V2) foi de 48,28 kN e, como já registrado, das vigas testemunhos de 94,96 kN. Desta maneira, observou-se um decréscimo de 49,2% na capacidade portante. O deslocamento vertical médio na ruptura das vigas COR-15 (V1 e V2) foi de 14,72 mm, comparado ao das vigas testemunho, de 36,20 mm: uma queda de 59,3%. A redução da carga última e do deslocamento vertical está associada ao agravamento do processo corrosivo, chegando a níveis críticos de redução da capacidade estrutural. Neste estudo, como detalhado, chegou-se, praticamente, a metade da capacidade de carregamento vigas com esse nível de corrosão. Em relação à estimativa teórica, verifica-se que o método de cálculo se mostra precipitado, apresentando valores teóricos acima dos valores experimentais, porém próximos.

#### 4.5.2 Padrão de ruptura

Constatou-se, pela análise do comportamento da relação entre carga e deslocamento, que a corrosão afetou o desempenho estrutural das vigas com processo corrosivo, principalmente com corrosão de 10 % e 15%. Quanto ao modo de ruptura das vigas, verificou-se que todas romperam na armadura longitudinal, porém apresentaram modos de ruptura distintos. O modo de ruptura apresentado pelas vigas testemunhos, sem corrosão, caracterizou-se pela deformação excessiva da armadura longitudinal, demonstrando um quadro de fissuração bastante acentuado, em conjunto com grandes deslocamentos verticais. Na Figura 67, apresenta-se o aspecto geral da fissuração das vigas sem corrosão.



Figura 67: Quadro geral de fissuração das viga sem corrosão

As vigas, com processo corrosivo, tiveram um modo de ruptura semelhante entre elas, porém se diferem do das vigas sem corrosão. A Figura 68 apresenta a ruptura das vigas com 5 % e 10% de corrosão. Para estas situações, a ruptura ocorreu pelo rompimento das armaduras longitudinais e, além disso, há uma perceptível redução do quadro de fissuração: indica redução da ductilidade das vigas corroídas.



Figura 68: Modo de ruptura das vigas com 5% de corrosão (a) e com 10% de corrosão (b)

As vigas com 15% de corrosão também apresentaram comportamento semelhante às vigas com taxas de 5 e 10%. A ruptura pode ser observada na Figura 69. Houve uma redução ainda mais acentuada do quadro de fissuração, logo, uma ainda maior redução da ductilidade.

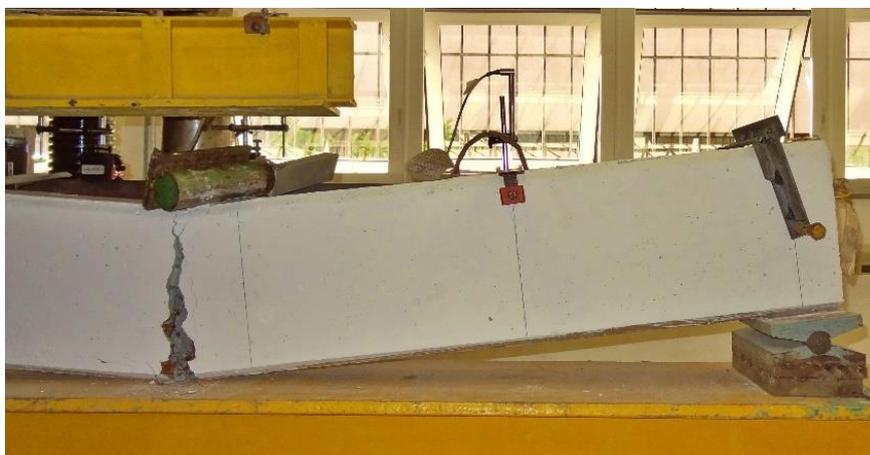


Figura 69: Modo de ruptura da vigas com 15% de corrosão

A Figura 70 (a) mostra a seção de ruptura da armadura longitudinal da viga com 15% de corrosão. Por sua vez, na Figura 70 (b) está a seção transversal de ruptura da mesma viga. Em ambas as imagens é perceptível a formação dos produtos de corrosão, bem como a fissuração da camada de cobrimento da viga.

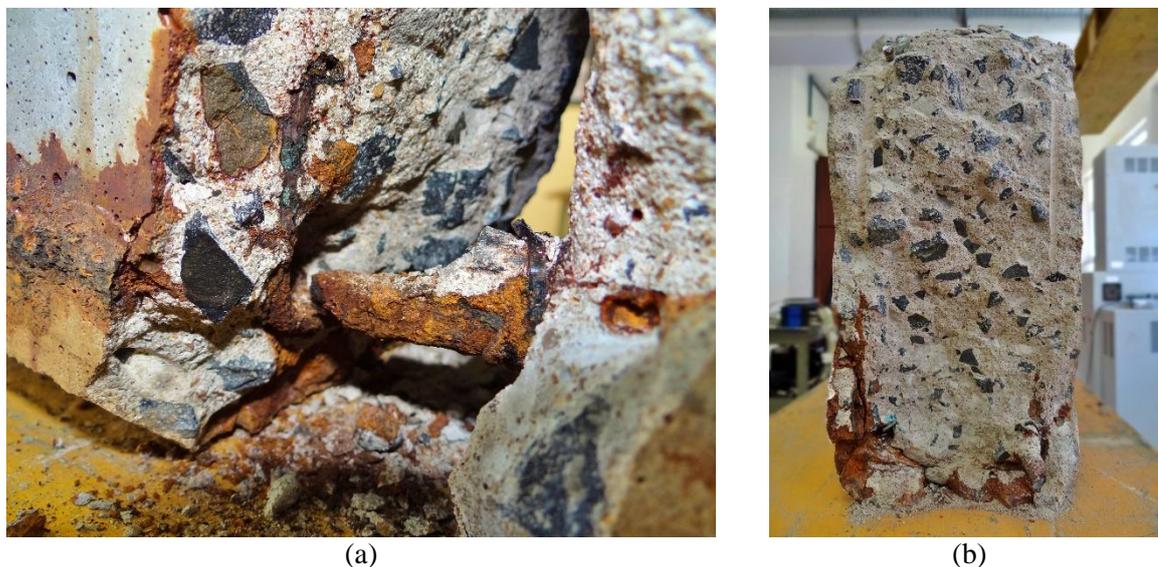


Figura 70: Detalhe da ruptura da armadura longitudinal corroída (a) e seção transversal de ruptura (b)

#### 4.5.3 Curva deformada da viga

As deformações ocorridas são essenciais para interpretar o comportamento estrutural de um elemento de concreto armado. No caso de vigas, as deformações acontecem, por um deslocamento do eixo longitudinal, geradas por cargas transversais. Conhecendo os deslocamentos verticais em diferentes pontos, foi possível traçar a curva deformada da viga, que representa a curvatura geométrica do deslocamento vertical dos pontos situados no eixo longitudinal de uma viga.

As curvas deformadas das vigas submetidas ao ensaio de flexão são mostradas na Figura 71. Representam as médias dos deslocamentos, para cada conjunto de vigas ensaiadas, em relação aos diferentes níveis de corrosão. As curvas deformadas das vigas representam as deformações relativas à carga máxima.

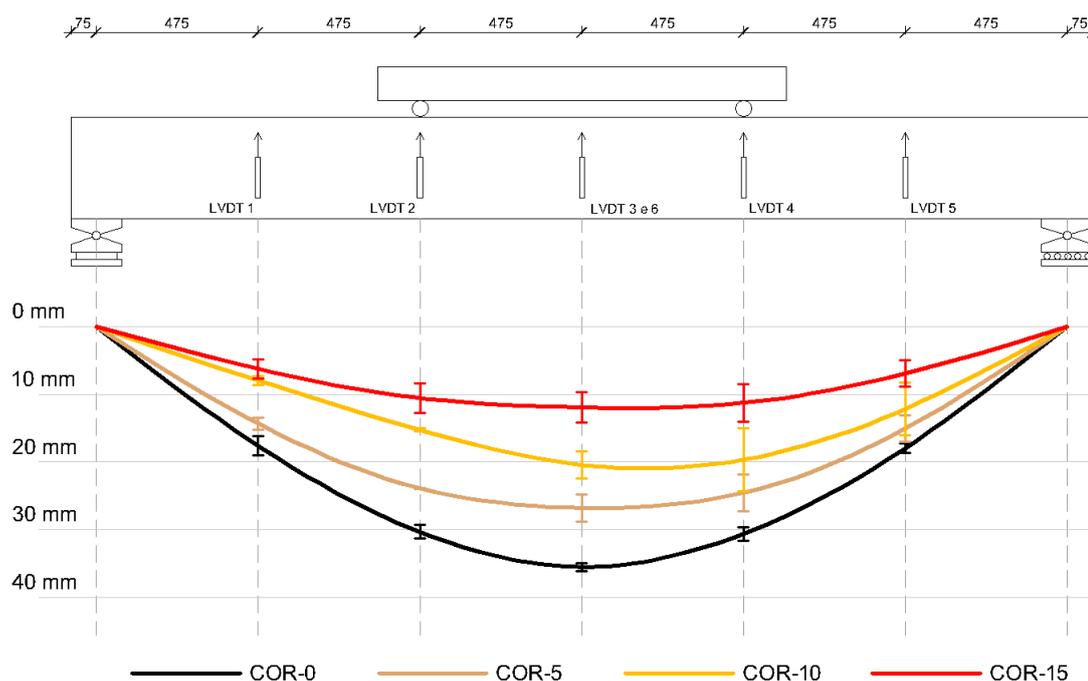


Figura 71: Curva deformada média para diferentes graus de corrosão

Na Figura 71, constata-se que as vigas com corrosão apresentaram curvas da deformada com menor curvatura em comparação à viga testemunho. Isso se deve à intensificação dos efeitos deletérios da corrosão, à medida que aumenta o nível de corrosão: elevando a expansão dos produtos de corrosão; fissurando a camada de cobrimento; e perdendo, progressivamente, a aderência entre o concreto e a armadura. Associa-se a estes fenômenos, a fragilização do aço frente ao processo corrosivo (ALMUSALLAM, 2001; ALMUSALLAM *et al.*, 1996; APOSTOLOPOULOS, 2007; APOSTOLOPOULOS; PAPADOPOULOS; PANTELAKIS, 2006; GRAEFF, 2007). A contração da curva deformada da viga, devido à corrosão, pode ser associada à perda de ductilidade à flexão das vigas corroídas. Assunto apresentado no próximo item.

#### 4.5.4 Ductilidade na flexão

A avaliação da ductilidade na flexão foi desenvolvida a partir do proposto por Thompson e Park (1980) e Lee e Pan (2003). Os autores definiram uma medida para quantificar a ductilidade, conhecido como fator de ductilidade. O fator de ductilidade é obtido pela relação entre os deslocamentos correspondentes à carga máxima e no escoamento do aço.

Os valores do deslocamento no escoamento do aço, para as vigas testemunhos, sem corrosão, foram determinados pela média do deslocamento quando a deformação específica das

armaduras ( $\epsilon_s$ ) foi igual a 3,19 %. A deformação do aço foi monitorada através de extensômetros. Conforme orientações de Thompson e Park (1980) e Lee e Pan (2003), para as vigas com corrosão, como as armaduras longitudinais não foram instrumentadas, os valores do deslocamento no escoamento do aço foram determinados pela intersecção da deflexão da curva da relação entre carga e deslocamento. Na Figura 72, está apresentado, de forma comparativa, o fator de ductilidade das vigas, com indicação da média entre as vigas de cada grupo e respectivos valores mínimos e máximos.

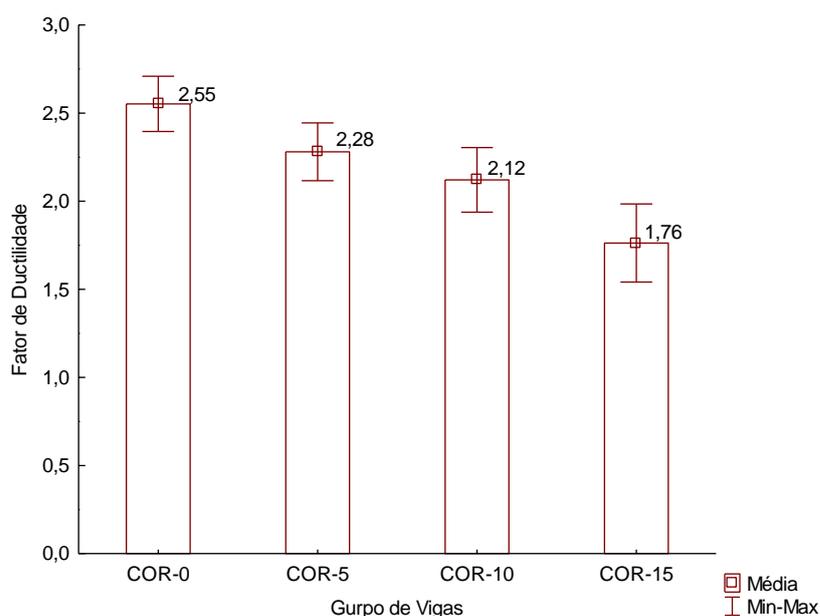


Figura 72: Fator de ductilidade dos grupos de vigas

Percebe-se que houve redução no fator de ductilidade para as vigas corroídas, decrescendo conforme há elevação da corrosão. Isso comprova que a corrosão afeta a ductilidade das vigas de concreto armado. Em níveis de corrosão de 15%, a ductilidade reduziu em 31%.

O resultado obtido está de acordo com aqueles obtidos por Almusallam (2001), DU *et al.* (2005) e Apostolopoulos *et al.* (2006). Estes autores concluíram que a corrosão afeta a ductilidade das armaduras, diminuindo a sua tenacidade, e, por consequência, ocorre a redução da ductilidade dos elementos de concreto armado, como constatado na Figura 72. Esta redução na ductilidade acarreta rupturas bruscas, sem aviso prévio. Assim o colapso de estruturas corroídas pode ocorrer de forma súbita. Portanto, cabe destacar a importância dos mecanismos de corrosão, visto seus efeitos deletérios no comportamento estrutural de elementos de concreto armado submetidos à flexão.

## 4.6 RECUPERAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS COM UHPFRC

Após a avaliação dos danos gerados pelo processo corrosivo, são apresentados e discutidos os resultados da recuperação de viga corroídas com uso do concreto UHPFRC. Avaliou-se, para este tipo de recuperação: a capacidade resistente, através da relação entre carga e deslocamento e, também, os modos de ruptura. Analisou-se, na sequência, a curva deformada da viga e a ductilidade na flexão.

### 4.6.1 Recuperação com UHPFRC: avaliação comportamento á flexão

Conforme apresentado na elaboração do programa experimental, a recuperação das vigas foi realizada para os níveis de corrosão de 10% e 15%, expressos em perda de massa. A avaliação da recuperação com UHPFRC foi realizada sobre duas perspectivas: o incremento de carga proporcionado pela recuperação em comparação ao grupo de vigas previamente corroídas e o processo de recuperação em paralelo às vigas testemunhos, isto é, sem corrosão.

O comportamento à flexão das vigas recuperadas com UHPFRC, em relação à carga e ao deslocamento, está ilustrado na Figura 73. O deslocamento é referente ao centro da viga. Foram utilizados como parâmetro de comparação os referentes às vigas corroídas sem recuperação e os valores da estimativa teórica de ruptura. A recuperação de vigas corroídas com UHPFRC gerou um acréscimo da carga de ruptura destas vigas em comparação às corroídas, independentemente, do nível de corrosão como demonstrado no gráfico da Figura 73.

Cabe recordar que as vigas, com uma faixa de corrosão de 10%, foram recuperadas com uma espessura de UHPFRC de 50 mm, e, as com corrosão de 15%, com espessura de 60 mm. Por esse motivo, provavelmente, os valores médios das cargas de rupturas das vigas recuperadas ficaram próximos, sendo de 90,24 kN quando 10% de corrosão (COR-10-UHPFRC) e de 87,62 kN, se 15% (COR-15-UHPFRC). Em relação à estimativa teórica, verifica-se que o método de cálculo se mostra adequado, apresentando valores teóricos, moderadamente, superiores aos dos valores experimentais.

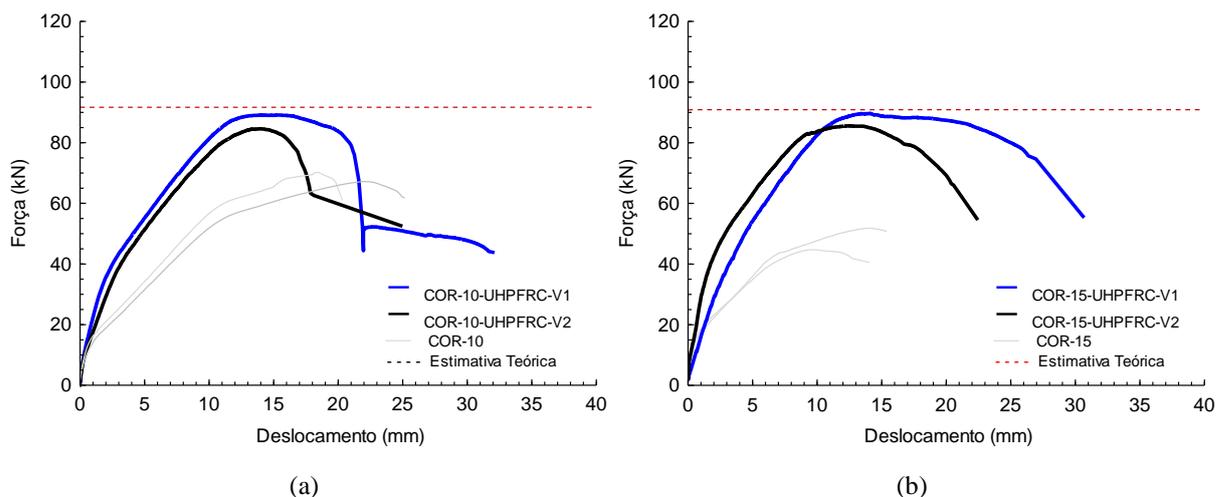


Figura 73: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com UHPFRC (a), vigas com 10% de corrosão (b), vigas com 15% de corrosão

As vigas com corrosão de 10 %, recuperadas com UHPFRC, apresentaram o comportamento ilustrado no gráfico da Figura 73 (a) – vigas COR-10-UHPFRC-V1 e COR-10-UHPFRC-V2, comparadas com os resultados das vigas corroídas sem recuperação (linhas COR-10). A média da carga máxima das vigas com 10% de corrosão, recuperadas com UHPFRC, foi de 90,24 kN e, para as não recuperadas, de 68,74 kN (COR-10). Comparando as médias, o processo de recuperação correspondente a um acréscimo de 31,3% na capacidade portante. Em relação aos deslocamentos verticais, as vigas com 10% de corrosão recuperadas alcançaram, na ruptura, valor de 28,55 mm e, as vigas com 10% de corrosão (COR-10), de 22,75 mm: incremento de 25,5% nas vigas com corrosão recuperadas. Portanto, estas vigas recuperadas com UHPFRC apresentam comportamento satisfatório quando comparadas às vigas corroídas, elevando a carga última e os deslocamentos na ruptura.

As vigas com corrosão de 15 % e recuperadas com UHPFRC, apresentaram o comportamento ilustrado na Figura 73 (b) para as vigas COR-15-UHPFRC-V1 e COR-15-UHPFRC-V2. Neste gráfico são comparadas com as vigas corroídas sem recuperação (representadas pelas linhas COR-15). A média da carga máxima das vigas com 15% de corrosão recuperadas com UHPFRC é de 87,62 kN, e, das vigas sem recuperação (COR-15), de 48,24 kN: um acréscimo de 87,62% na capacidade portante das vigas corroídas recuperadas. A média dos deslocamentos verticais das vigas com 15% de corrosão recuperadas, na ruptura, é de 26,56 mm, enquanto, das vigas sem recuperação, de 14,72 mm. Obteve-se um incremento de 80,5% no deslocamento vertical de ruptura nas vigas com corrosão recuperadas. Portanto, verificou-se que as vigas com corrosão de 15% recuperadas com UHPFRC, apresentam comportamento notável quando

comparadas às vigas corroídas, elevando carga última e os deslocamentos na ruptura. Em síntese, o processo de recuperação com UHPFRC da vigas corroídas ensaiadas promoveu acréscimo na capacidade estrutural, comparando-se às vigas corroídas sem nenhum procedimento de recuperação

Com a finalidade de avaliar o desempenho do procedimento de recuperação com UHPFRC, seus resultados, também, foram comparados com os das vigas testemunhos sem corrosão. Este comportamento está ilustrado na Figura 74. A recuperação com UHPFRC gerou, em relação ao nível de carregamento, valor médio muito próximo ao obtido para as vigas sem corrosão, mas não superando a de carga máxima obtida por essas últimas. Este é um comportamento inverso, em relação ao esperado, da comparação entre vigas corroídas recuperadas e não recuperadas.

Para o caso das vigas com corrosão de 10 %, recuperadas com UHPFRC (COR-10-UHPFRC-V1 e COR-10-UHPFRC-V2), comparativamente as vigas sem corrosão (linha COR-0) a representação gráfica está na Figura 74 (a). A média das cargas máximas para as vigas, recuperadas com UHPFRC, ficou 5,0% abaixo das vigas sem corrosão. Em relação aos deslocamentos na ruptura, houve redução de 21,1%. Constata-se, também, que houve aumento da rigidez da viga, perceptível pelo diagrama que relaciona carga e deslocamento, assim como uma provável redução da ductilidade.

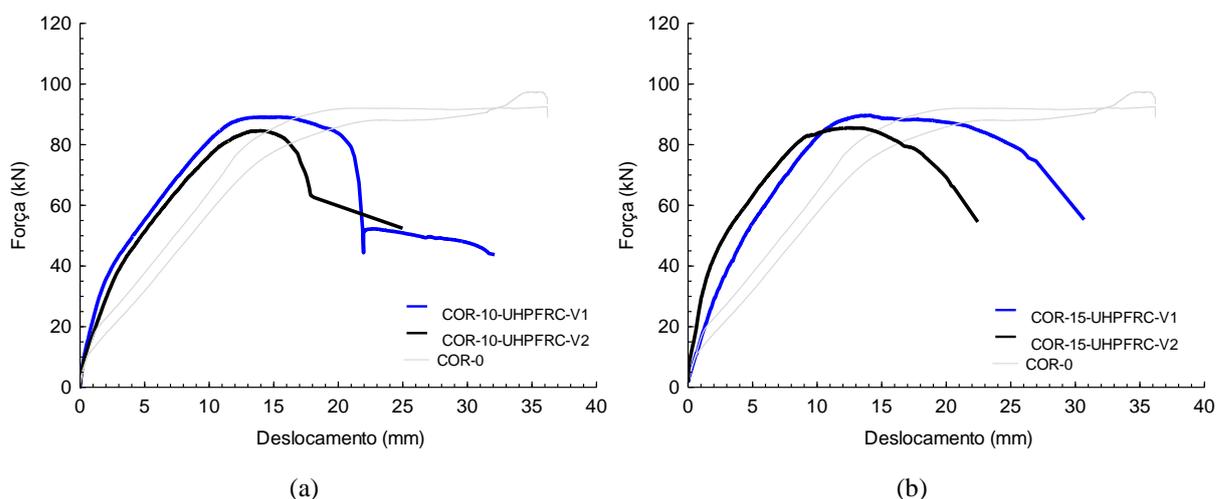


Figura 74: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com UHPFRC (a), vigas com 10% de corrosão (b), vigas com 15% de corrosão em comparação às vigas testemunhos

Os resultados relativos as vigas com corrosão de 15 %, recuperadas com UHPFRC (COR-15-UHPFRC-V1 e COR-15-UHPFRC-V2), em comparação com os das vigas sem

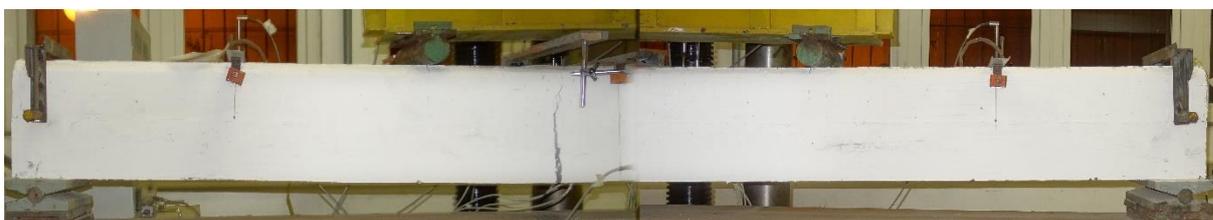
corrosão (linha COR-0), apresentaram o comportamento ilustrado na Figura 74 (b). O gráfico mostra que a média da carga máxima para as vigas recuperadas com UHPFRC, ficou 7,7% abaixo da obtida para as vigas sem corrosão. Em relação aos deslocamentos na ruptura, houve redução de 26,6%. Assim como observado para a viga recuperada com 10% de corrosão, constatou-se que houve aumento da rigidez da viga, perceptível pelo diagrama relacionando carga e deslocamento, e, provavelmente, redução da ductilidade.

#### 4.6.2 Recuperação com UHPFRC: padrão de ruptura

Constatou-se, pela análise do comportamento da relação carga x deslocamento no gráfico, que a recuperação com UHPFRC das vigas corroídas elevou a capacidade estrutural em relação às vigas corroídas não recuperadas e ficou com valores muito próximos aos das vigas sem corrosão. Porém, foi perceptível a alteração do comportamento na ruptura, principalmente na relação entre às vigas recuperadas e as testemunhos. Na Figura 75, é apresentado o quadro geral de fissuração, instantes antes da ruptura, das vigas sem corrosão – 75 (a), com corrosão de 10% e recuperada com UHPFRC – 75 (b), e com corrosão de 15% e recuperada com UHPFRC – 75 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 75: Quadro geral de fissuração instantes antes da ruptura da viga sem corrosão (a), com corrosão de 10% e recuperada com UHPFRC (b), e com corrosão de 15% e recuperada com UHPFRC (c)

O modo de ruptura apresentado pelas vigas testemunhos foi caracterizado por um quadro de fissuração bastante acentuado em conjunto com grandes deslocamentos verticais – Figura 75 (a). As vigas corroídas e recuperadas, indiferente do nível de corrosão, tiveram, inicialmente, ruptura na camada de recuperação seguida pelo rompimento das armaduras longitudinais. Além disto, há uma perceptível redução no quadro de fissuração, indicando uma redução da ductilidade das vigas corroídas.

As vigas recuperadas tiveram um modo de ruptura semelhante entre elas, porém diferenciado se comparado com as vigas sem corrosão. A Figura 76, apresentou o comportamento, instantes antes da ruptura, da viga recuperada com UHPFRC – 76 (a) – e, em seguida, ocorre a ruptura – 76 (b). Observa-se que a ruptura ocorreu, inicialmente, na camada de recuperação – 76 (c) – e, logo após, aconteceu o rompimento das armaduras longitudinais (d).

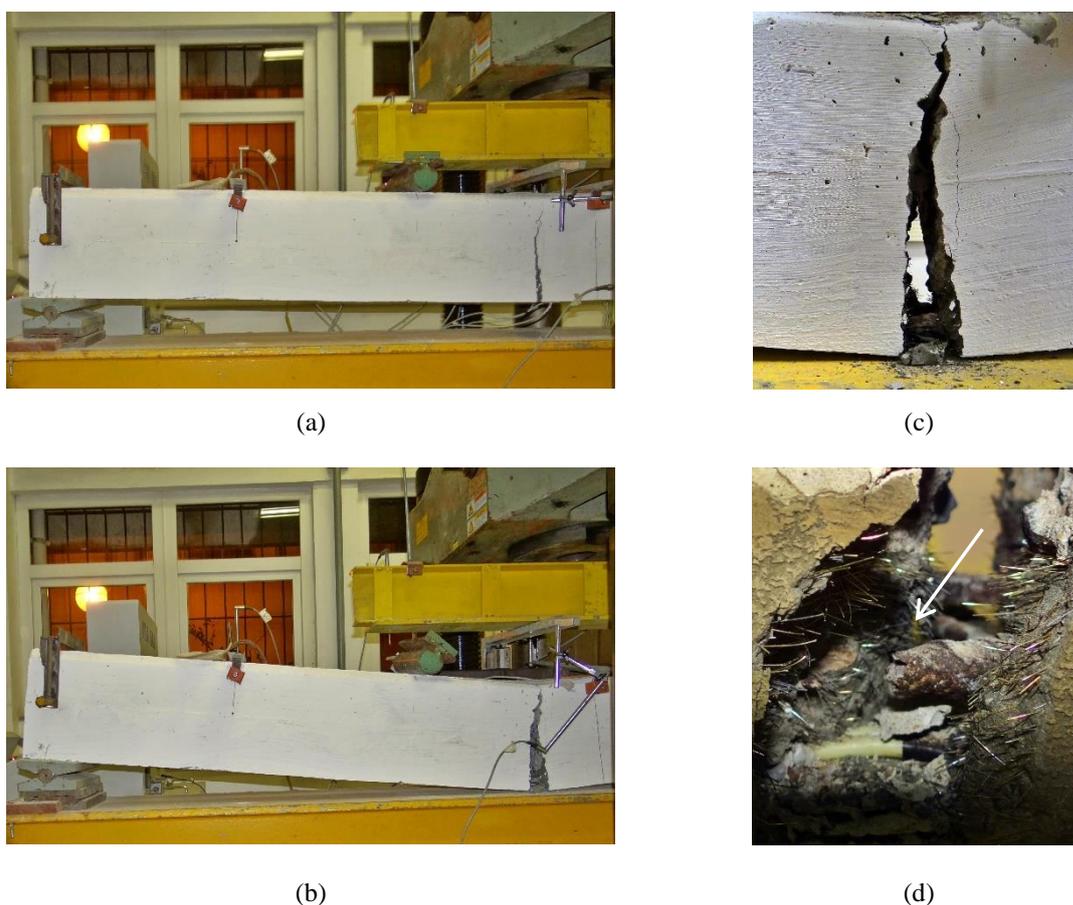


Figura 76: Sequência de ruptura das recuperadas com UHPFRC, instantes antes da ruptura (a), após a ruptura (b), detalhe da seção de ruptura (c) e, ruptura da armadura longitudinal (d)

### 4.6.3 Recuperação com UHPFRC: curva deformada da viga

A curva deformada, representativa das vigas com corrosão de 10 % e recuperadas com UHPFRC, está na Figura 77. Relaciona a média dos deslocamentos para cada conjunto de vigas em relação aos deslocamentos das vigas corroídas (no mesmo nível de corrosão) e as testemunhos. As curvas deformadas das vigas representam as deformações relativas à carga máxima.

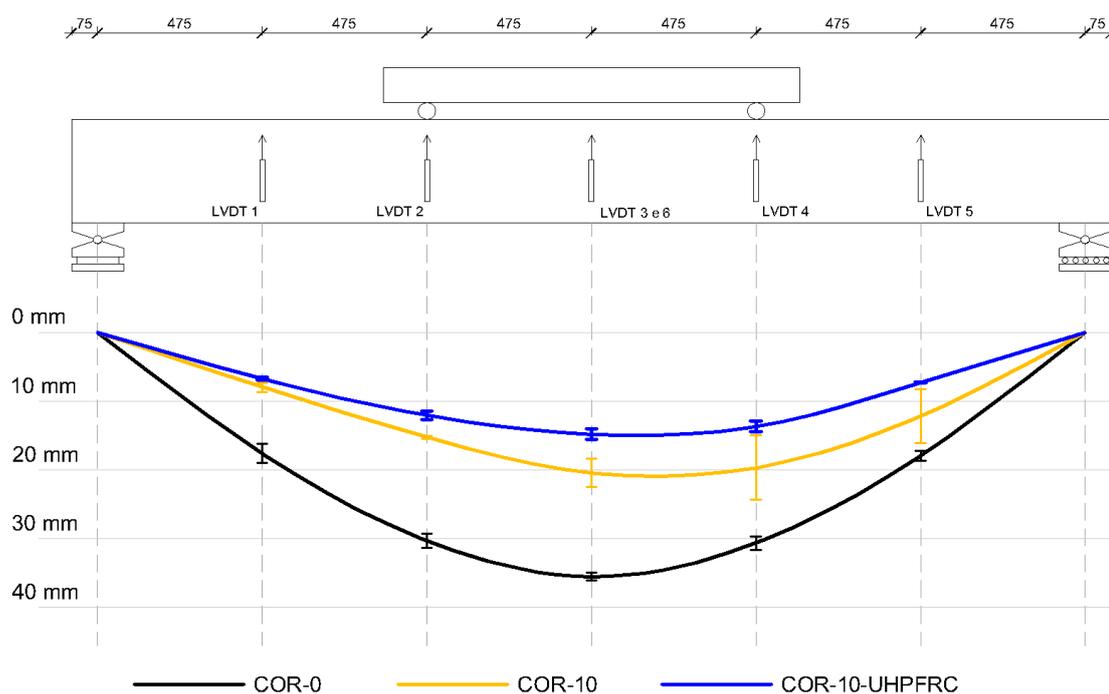


Figura 77: Curva deformada média para as vigas com corrosão de 10 % e recuperadas com UHPFRC

Foi observado, no diagrama carga x deslocamento, que a viga recuperada com UHPFRC apresentou maior rigidez. Tal constatação também pode ser verificada na Figura 77: a curva deformada das vigas recuperadas com UHPFRC está contraída, tem menor curvatura, em comparação aquela das vigas testemunhos e corroídas, indicando maior rigidez das vigas recuperadas.

Os valores das vigas com corrosão de 15 % e recuperadas com UHPFRC, em comparação com os das vigas corroídas (ao mesmo nível de corrosão) e das testemunhos, quanto a curva deformada, é ilustrada na Figura 78. A curva deformada representa as deformações médias relativas à carga máxima. Observa-se um comportamento semelhante entre as vigas recuperadas e corroídas. Tal fato corrobora a constatação observada no diagrama carga x deslocamento – Figura 73 (b) – em que ambos os conjuntos de vigas, recuperadas com

UHPFRC e corroídas, apresentaram deslocamento na carga máxima próximos. Quanto à rigidez das vigas, observa-se as curvas deformadas tanto do conjunto das vigas recuperadas com UHPFRC quanto das vigas corroídas, contraídas em comparação à representação das vigas testemunhos, indicando maior rigidez das vigas recuperadas.

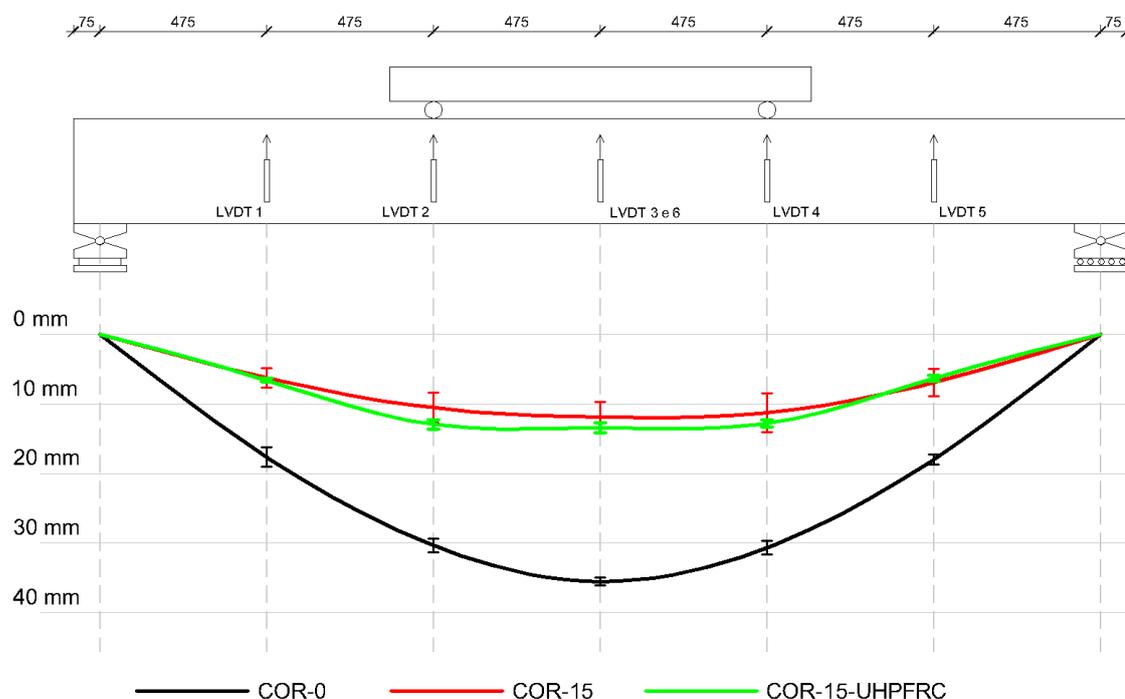


Figura 78: Linha elástica média para as vigas com corrosão de 15 % e recuperadas com UHPFRC

#### 4.6.4 Recuperação com UHPFRC: análise das deformações específicas

Além de sensíveis modificações no comportamento dos deslocamentos verticais, a recuperação das vigas corroídas com UHPFRC, ou seja, a aplicação de um reforço na zona tracionada, faz com que o reforço passe a dividir, com as barras de armadura, a resultante das tensões de tração atuantes na seção transversal desta viga. Portanto, a presença de um elemento de reforço conduz, naturalmente, a uma redução na deformação específica das armaduras. A partir dos resultados experimentais é constatada esse fenômeno.

Observa-se que o escoamento da armadura das vigas testemunhos, COR-0-V1 e COR-0-V2, ocorreu em 74,9 kN e 69,5 kN, respectivamente, com média de 72,2 kN. Identificada a média da força de escoamento, foi comparada a deformação específica na carga de 72,2 kN para as vigas corroídas e recuperadas com UHPFRC. O resultado das deformações específicas está no gráfico da Figura 79, relacionando a média obtida para cada grupo de vigas.

Pela Figura 79, comprovou-se que a recuperação com UHPFRC das vigas corroídas reduz a deformação específica das armaduras, para um mesmo nível de carga. Isso indica, portanto, que a recuperação proporcionou uma redução na tensão aplicada à armadura corroída, contribuindo para o incremento de carga proporcionado pela recuperação.

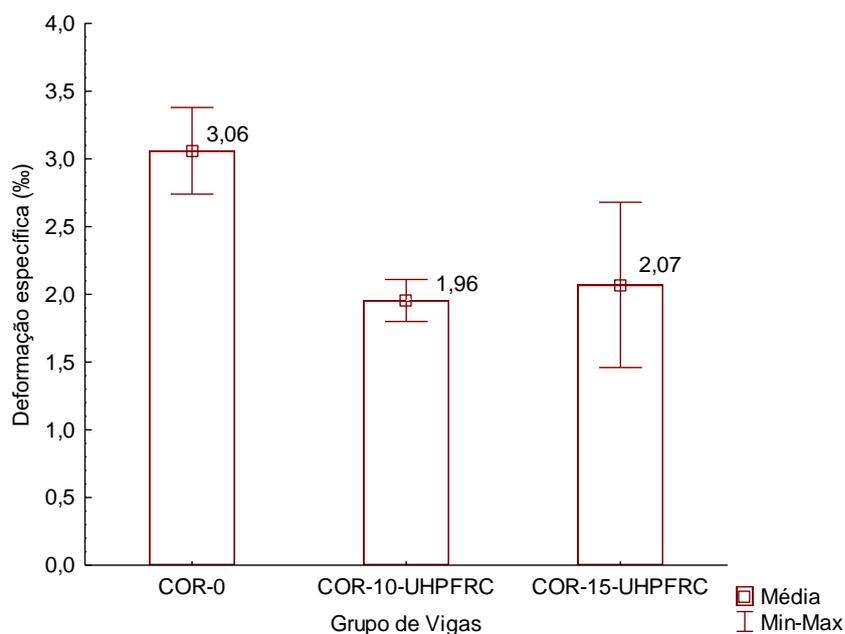
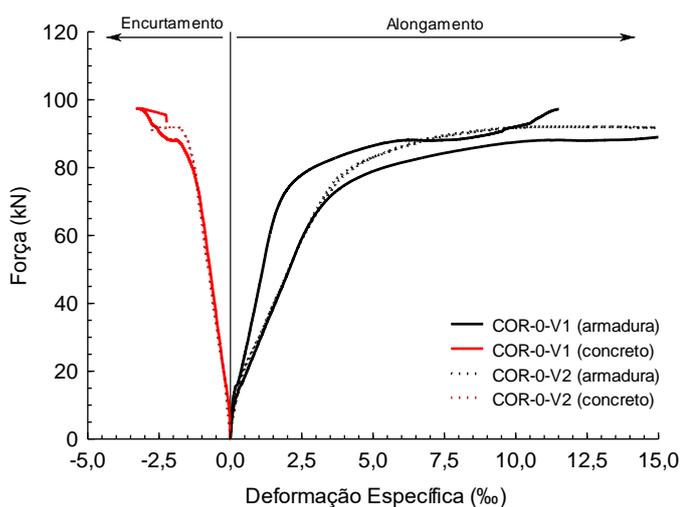


Figura 79: Deformações específicas média das armaduras na carga de 72,2 kN

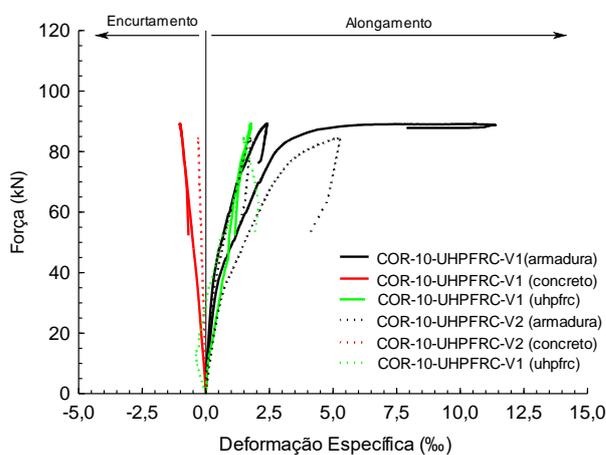
Para uma melhor compreensão do comportamento estrutural das vigas recuperadas, na Figura 80, é representado o diagrama carga x deformação específica para: Figura 80 (a) – vigas testemunhos; Figura 80 (b) – vigas com 10% de corrosão e recuperadas com UHPFRC; e, Figura 80 (c) – vigas com 15% de corrosão e recuperadas com UHPFRC. As deformações específicas apresentadas são relativas à seção transversal central, porém, não necessariamente, a seção de ruptura. Todavia devido à característica do ensaio de flexão (momento constante no terço médio e cisalhamento nulo) as deformações na seção central podem ser aproximadas à seção de ruptura. Nesta Figura 80, observa-se que ocorre uma inclinação da curva de deformações específicas no concreto das vigas recuperadas com UHPFRC, Figuras 80 (b) e (c), em comparação com a viga sem corrosão – Figura 80 (a).

Analisando o comportamento do UHPFRC, observa-se dois estágios. No primeiro, verifica-se comportamento linear até a fissuração da camada de reforço. Após, no segundo estágio, há incremento das deformações específicas do UHPFRC, caracterizado pelo aumento da fissuração e atuação das fibras do material. Paralelamente, há o acréscimo das deformações específicas da armadura, indicado a compatibilidade das deformações específicas entre as

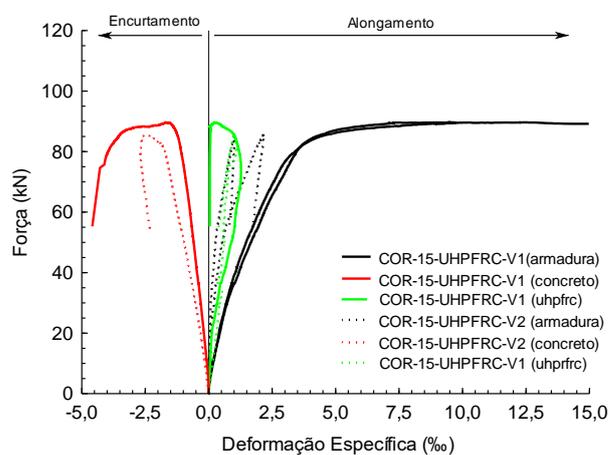
armaduras e a camada de recuperação de UHPFRC. O comportamento descrito, registrado nas Figura 80 (b) e (c), indica que houve uma aderência recíproca entre os materiais. Da mesma maneira, a análise do padrão de ruptura possibilita verificar que houve a propagação da fissura da camada de recuperação em UHPFRC até a zona comprimida do concreto, indicando que há aderência entre a camada de recuperação e o concreto da viga.



(a)



(b)



(c)

Figura 80: Diagrama carga x deformação específica das vigas testemunhos (a), vigas com 10% de corrosão e recuperadas com UHPFRC (b) e, vigas com 15% de corrosão e recuperadas com UHPFRC (c)

#### 4.6.5 Recuperação com UHPFRC: ductilidade na flexão

A avaliação da ductilidade na flexão, como citado anteriormente, foi desenvolvida a partir do proposto por Thompson e Park (1980) e Lee e Pan (2003). Os valores do deslocamento no escoamento do aço, para as vigas sem corrosão, foram determinados pela média do deslocamento quando a deformação específica das armaduras ( $\epsilon_s$ ) foi igual a 3,19 %. A deformação do aço foi monitorada através de extensômetro.

As vigas com corrosão sofrem fragilização do aço e, conforme Apostolopoulos *et al.* (2006) e Almusallam (2001), as tensões de escoamento variam assim como o alongamento do aço ao escoamento. Desta forma, os valores do deslocamento no escoamento do aço foram determinados pela intersecção da deflexão da curva carga x deslocamento, conforme orientações de Thompson e Park (1980) e Lee e Pan (2003). Na Figura 81, está apresentado o gráfico do fator de ductilidade das vigas, com indicação da média entre as vigas de cada grupo e respectivos valores mínimos e máximos. Os valores são apresentados para as vigas testemunhos, corroídas e corroídas recuperadas.

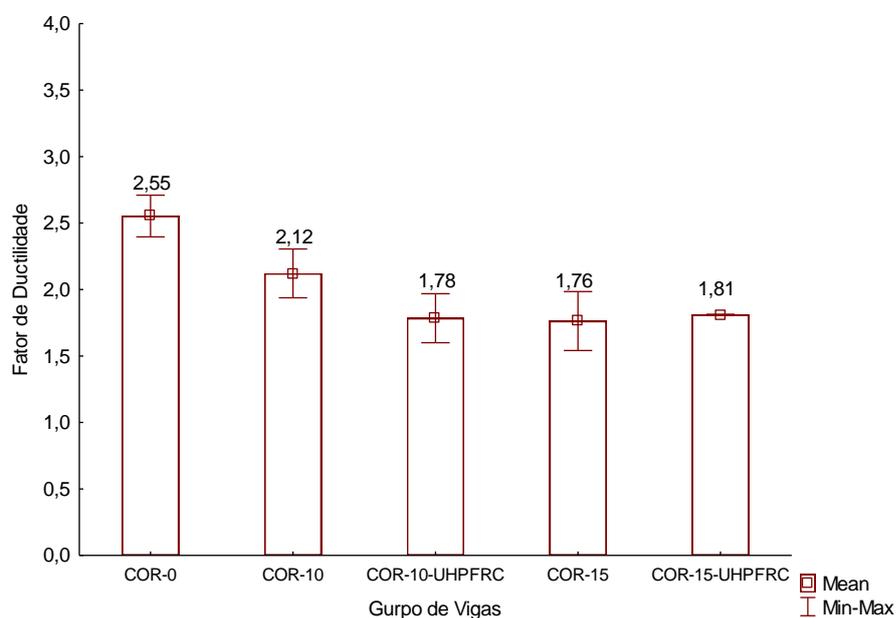


Figura 81: Fator de ductilidade para grupos de vigas recuperadas

Percebe-se que houve redução no fator de ductilidade para as vigas corroídas, decrescendo conforme se eleva a corrosão, já discutido no item 4.5.4. Quando comparado ao fator de ductilidade das vigas recuperadas com UHPFRC, notou-se que há redução do fator de ductilidade em relação às vigas sem corrosão. Porém, não é possível afirmar que houve variação da ductilidade entre as vigas recuperadas em relação às corroídas.

## 4.7 RECUPERAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO CORROÍDAS COM CONCRETO TÊXIL

Após a avaliação dos danos gerados pelo processo corrosivo, são apresentados e descritos os resultados da recuperação, com uso do Concreto Têxtil, de vigas corroídas. Avaliou-se a recuperação com Concreto Têxtil considerando-se: capacidade resistente, através da relação carga x deslocamento, e os modos de ruptura. Após, foi feita análise da curva deformada da viga e a avaliação da ductilidade na flexão.

### 4.7.1 Recuperação com Concreto Têxtil: avaliação do comportamento à flexão

Conforme apresentado, na elaboração do programa experimental, a recuperação das vigas foi realizada para os níveis de corrosão de 10% e 15%, expressos em termos de redução da seção transversal. A avaliação da recuperação com Concreto Têxtil foi realizada sobre duas perspectivas. Inicialmente, avaliou-se o incremento de carga proporcionado pela recuperação em comparação ao grupo de vigas previamente corroídas. Em um segundo momento, avaliou-se os resultados do processo de recuperação frente às vigas testemunhos, isto é, sem corrosão.

O comportamento à flexão das vigas recuperadas com Concreto Têxtil, em relação a carga e o deslocamento, está ilustrado na Figura 82. O deslocamento representado no gráfico é referente ao deslocamento central. Foi utilizado como parâmetro de comparação os resultados das vigas corroídas sem recuperação, mas, também, é apresentado a estimativa teórica de ruptura. A recuperação de vigas corroídas com Concreto Têxtil gerou um acréscimo da carga de ruptura das vigas recuperadas em comparação as corroídas. Isto ocorreu de forma independente do nível de corrosão como se pode verificar na Figura 82.

Como já mencionado, vigas com corrosão de 10% foram recuperadas com duas camadas da malha têxtil e, as com corrosão de 15%, com três camadas. Por esse motivo o valores médios das cargas de ruptura das vigas recuperadas ficaram próximas, sendo de 96,13 kN, quando 10% de corrosão (COR-10-TEXTIL), e de 107,18 kN, na corrosão de 15% (COR-15-TEXTIL). Em relação à estimativa teórica, verifica-se que o método de cálculo se mostra conservador, apresentando valores teóricos moderadamente inferiores aos dos valores experimentais.

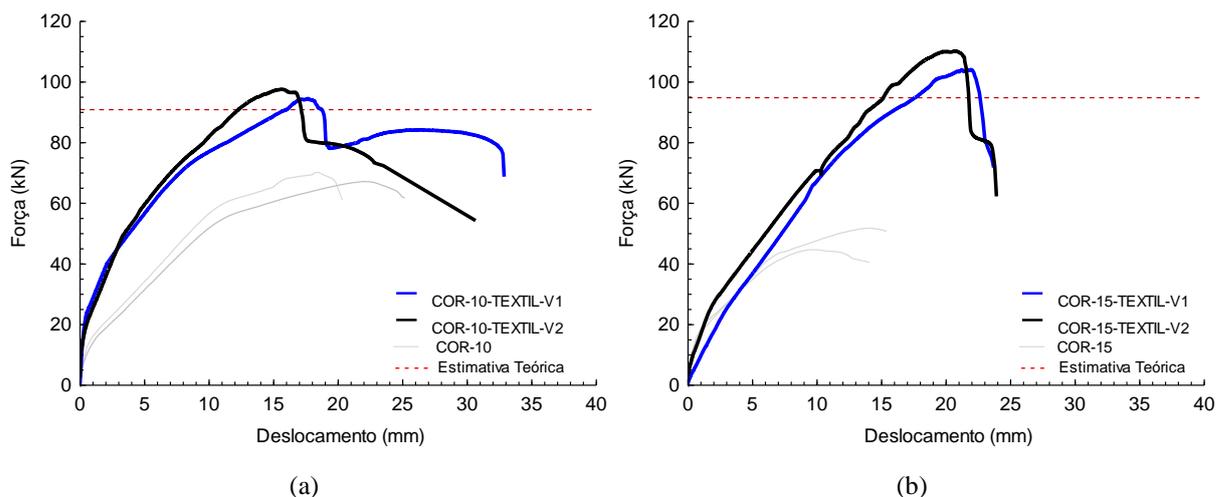


Figura 82: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com Concreto Têxtil, vigas com 10% de corrosão(a), vigas com 15% de corrosão (b)

A Figura 82 (a) apresenta o comportamento das vigas com corrosão de 10 %, sem recuperação, representadas pela linha COR-10, e o das recuperadas com Concreto Têxtil (COR-10-TEXTIL-V1 e COR-10-TEXTIL-V2). Na comparação, observa-se que a média da carga máxima das vigas com 10% de corrosão foi de 68,74 kN (COR-10) e a das vigas recuperadas com Concreto Têxtil, média de 96,13 kN. Assim, o processo de recuperação proporcionou um acréscimo de 39,8% na capacidade portante das vigas corroídas recuperadas, num nível de corrosão de 10%. Para os deslocamentos verticais, na ruptura, a média dos valores nas vigas corroídas e recuperadas é de 31,75 mm, enquanto para as vigas com 10% de corrosão (COR-10) é de 22,75 mm. Nesta comparação, verifica-se um incremento de 39,6% no deslocamento vertical de ruptura nas vigas com corrosão recuperadas. Portanto, as vigas com corrosão de 10% recuperadas com Concreto Têxtil apresentaram comportamentos satisfatórios quando comparadas às vigas corroídas, elevando carga última e os deslocamentos na ruptura.

As vigas com corrosão de 15 % e recuperadas com Concreto Têxtil (COR-10-TEXTIL-V1 e COR-10-TEXTIL-V2), tem seu comportamento ilustrado Figura 82 (b), sendo comparado com as vigas corroídas sem recuperação (linha COR-15). A média das cargas máximas das vigas recuperadas com Concreto Têxtil foi de 107,18 kN e, das não recuperadas (COR-15), de 48,24 kN. Desta forma, o processo de recuperação correspondeu a um acréscimo expressivo de 122,0% na capacidade portante das vigas corroídas recuperadas. Quanto as médias dos deslocamentos verticais na ruptura, as vigas com 15% de corrosão recuperadas apresentaram valor de 23,80 mm e, aquelas sem recuperação, de 14,72 mm. Este acréscimo, representa incremento de 61,7% no deslocamento vertical de ruptura nas vigas com corrosão recuperadas.

Assim, de forma resumida, verificou-se que as vigas com corrosão de 15% recuperadas com Concreto Têxtil apresentaram comportamento notável quando comparadas às vigas corroídas, elevando carga última e o deslocamento na ruptura. Além disto, promoveu um acréscimo na capacidade estrutural, comparando-se às vigas corroídas sem recuperação.

Com a finalidade de avaliar o desempenho do procedimento de recuperação, comparou-se os resultados do processo de recuperação em relação às vigas testemunhos sem corrosão. Assim, o comportamento destas vigas à flexão, comparativamente, está no gráfico da Figura 83. A recuperação com Concreto Têxtil, como já detalhado, gerou um acréscimo da carga de ruptura das vigas recuperadas em comparação as vigas corroídas e, ainda mais, elevou o valor de carregamento suportado, pelas vigas recuperadas, além daquele obtido para as vigas testemunhos.

As vigas com corrosão de 10 % recuperadas com Concreto Têxtil (COR-10-TEXTIL-V1 e COR-10-TEXTIL-V2), apresentaram o comportamento ilustrado na Figura 83 (a) quando comparado com o obtido pelas vigas sem corrosão (linha COR-0). A média da carga máxima para as vigas recuperadas com Concreto Têxtil, ficou 1,2% acima das vigas sem corrosão: praticamente o mesmo nível de carregamento. Em relação aos deslocamentos na ruptura, houve redução de 12,3%. Constatou-se, também, que ocorreu aumento da rigidez da viga, perceptível pelo diagrama carga x deslocamento, assim como uma provável redução da ductilidade.

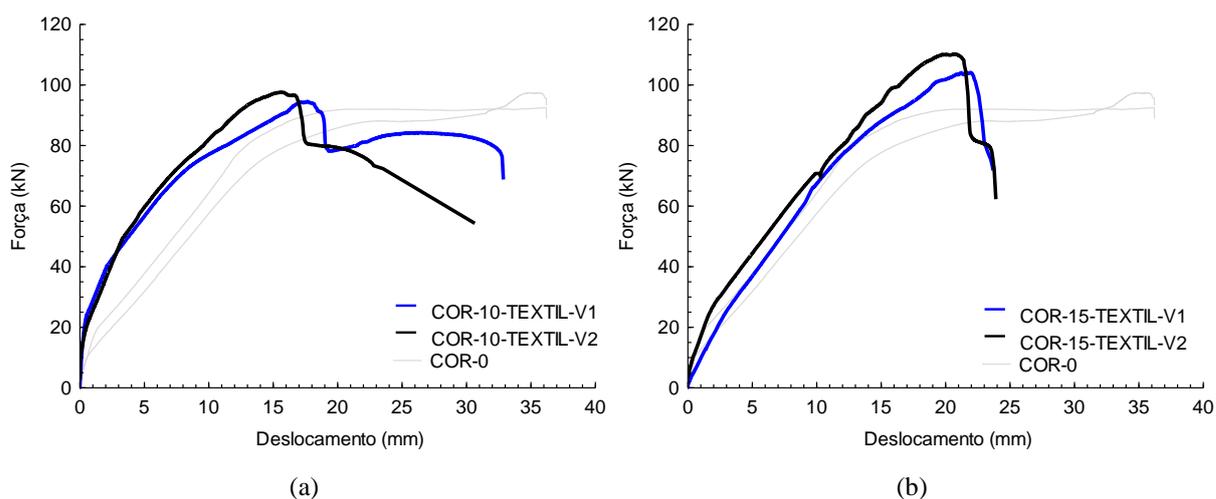


Figura 83: Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas recuperadas com Concreto Têxtil (a), vigas com 10% de corrosão (b), vigas com 15% de corrosão em comparação às vigas testemunhos

As vigas recuperadas com Concreto Têxtil com corrosão de 15 % (COR-15-TEXTIL-V1 e COR-15-TEXTIL-V2), tem seu comportamento está representado na Figura 83 (b), comparativamente às vigas sem corrosão (linha COR-0). A média da carga máxima para as vigas recuperadas com Concreto Têxtil, ficou 12,9% acima das vigas sem corrosão. Em relação aos deslocamentos na ruptura, houve redução de 34,3%. Verificou-se, também, que houve aumento da rigidez da viga, perceptível pelo diagrama carga x deslocamento, assim como uma provável redução da ductilidade.

#### 4.7.2 Recuperação com Concreto Têxtil: padrão de ruptura

Em relação às vigas recuperadas com Concreto Têxtil é perceptível a alteração do comportamento na ruptura, principalmente em relação as vigas testemunhos. O modo de ruptura é apresentado na Figura 84 (a). As vigas corroídas e recuperadas, indiferente do nível de corrosão, apresentaram, inicialmente, ruptura na camada do têxtil e, em seguida, pelo rompimento das armaduras longitudinais. Além disso, há uma breve redução no quadro de fissuração. Comparando-se com a recuperação em UHPFRC, houve maior distribuição das fissuras nas vigas recuperadas com Concreto Têxtil. Na Figura 84, apresenta-se o quadro geral de fissuração das vigas recuperadas com Concreto Têxtil, instantes antes da ruptura: Figura 84 (b) – para corrosão de 10% e, Figura 84 (c), quando 15%.

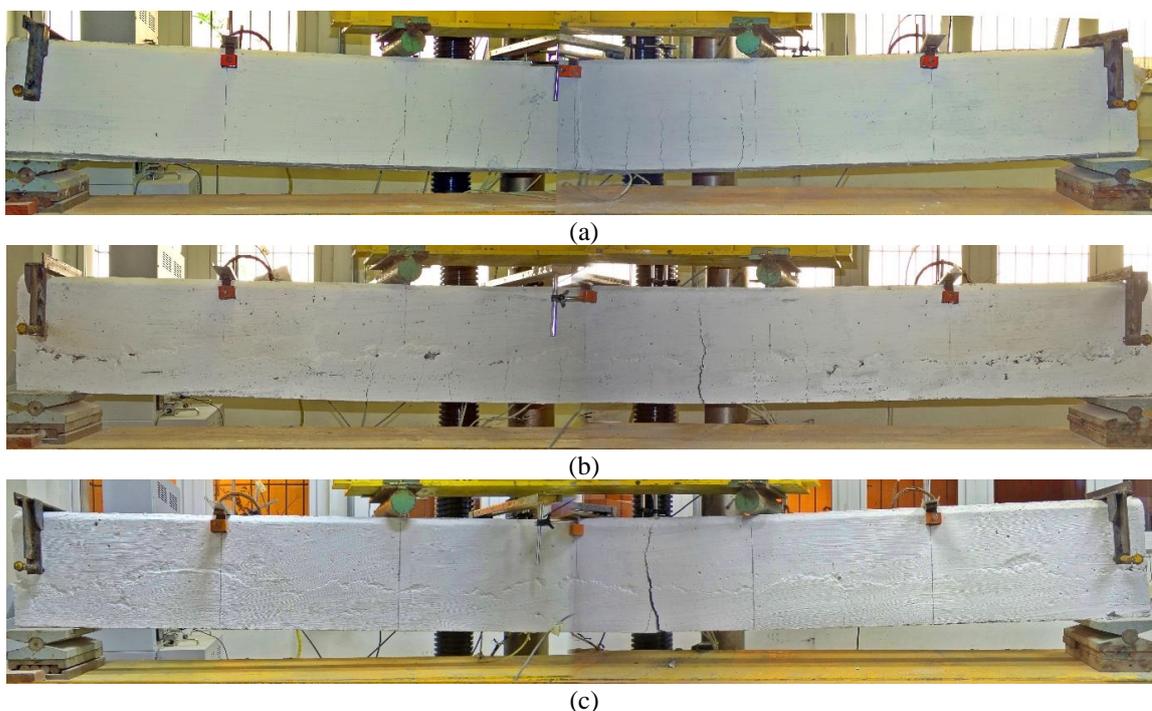


Figura 84: Quadro geral de fissuração instantes antes da ruptura da viga sem corrosão (a), com corrosão de 10% e recuperada com Concreto Têxtil (b), e com corrosão de 15% e recuperada com Concreto Têxtil (c)

As vigas recuperadas com Concreto Têxtil tiveram modos de ruptura semelhantes entre elas, porém diferentes das vigas sem corrosão. A Figura 85, apresenta o comportamento da viga recuperada com Concreto Têxtil instantes antes da ruptura – Figura 85 (a), em seguida ocorre a ruptura – Figura 85 (b). Observa-se que a ruptura ocorreu, inicialmente, na camada de recuperação – Figura 85 (c), seguida pelo rompimento das armaduras longitudinais – Figura 85 (d).

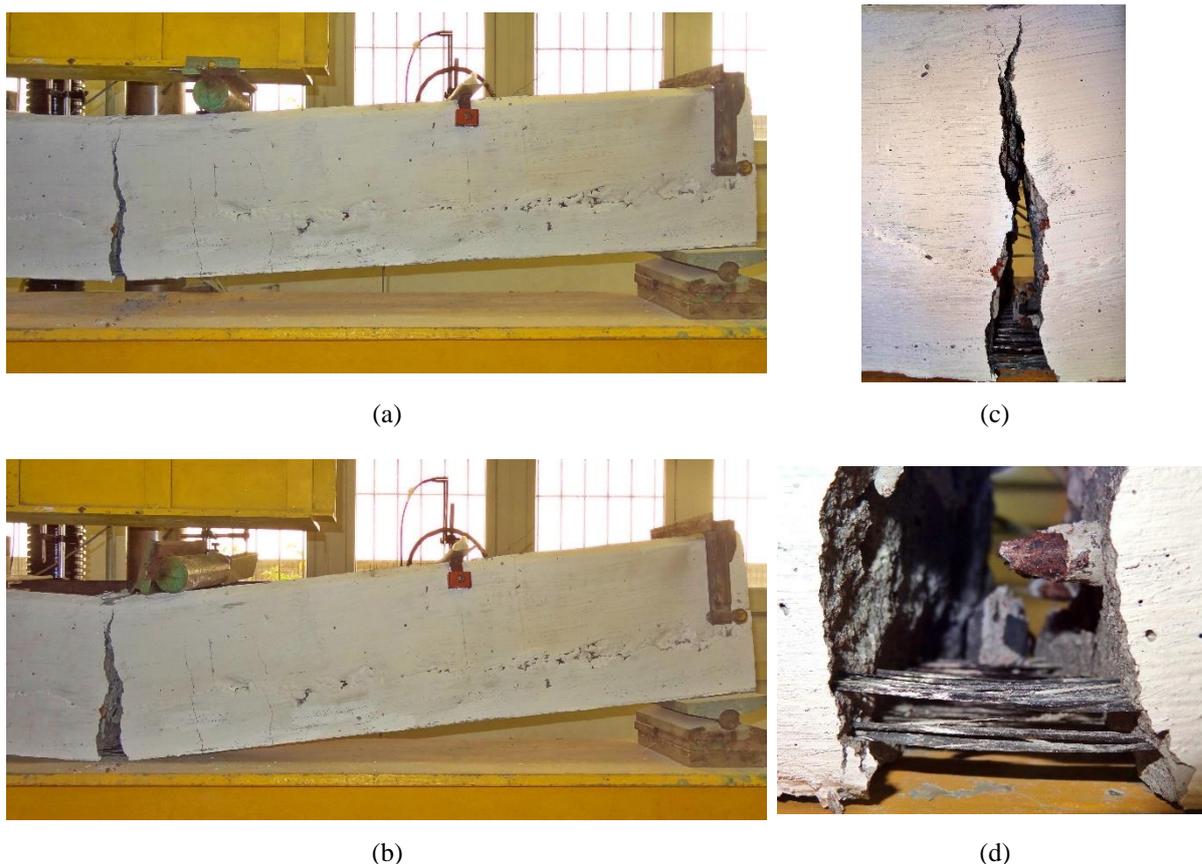


Figura 85: Sequência de ruptura das recuperadas com Concreto Têxtil, instantes antes da ruptura (a), após a ruptura (b), detalhe da seção de ruptura (c) e, ruptura da armadura longitudinal (d)

#### 4.7.3 Recuperação com Concreto Têxtil: curva deformada da viga

A curva deformada representativa das vigas com corrosão de 10 % ,recuperadas Concreto Têxtil, está na Figura 86. Relaciona a média dos deslocamentos para cada conjunto de vigas em relação aos deslocamentos das vigas corroídas (ao mesmo nível de corrosão) e testemunhos. As curvas deformadas das vigas representam as deformações relativas à carga máxima. Como foi observado no diagrama carga x deslocamento, a viga recuperada com Concreto Têxtil apresentou maior rigidez se comparada a viga sem corrosão, tal constatação também pode ser observada na Figura 86.

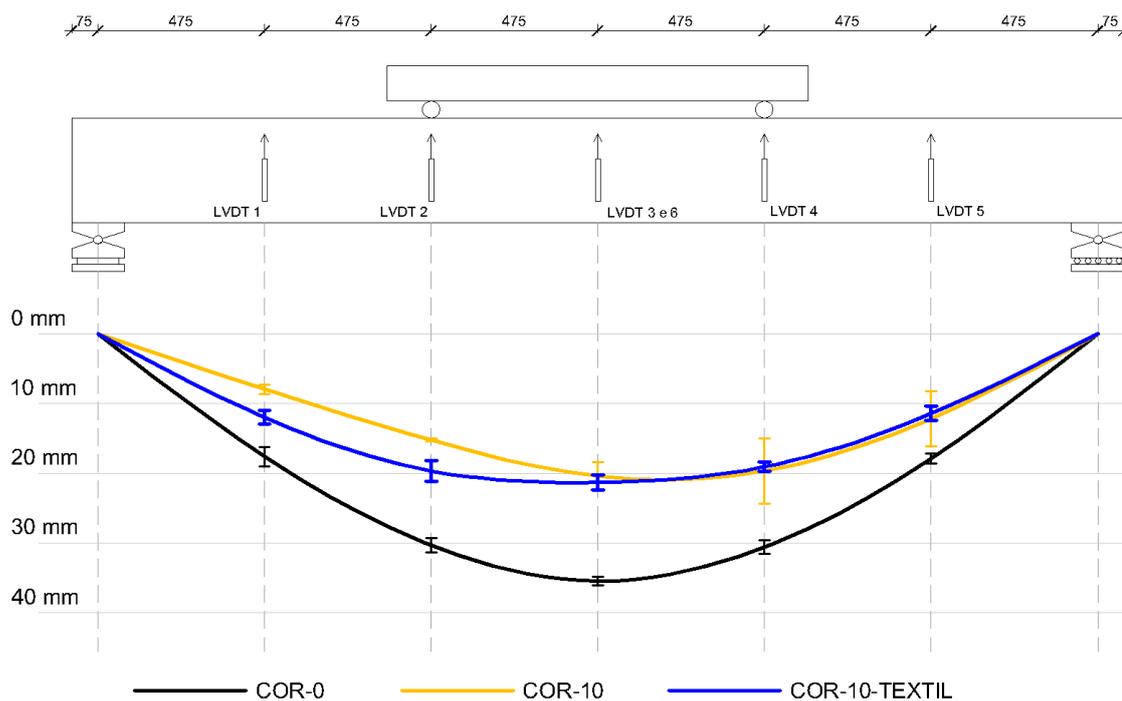


Figura 86: Curva deformada média para as vigas com corrosão de 10 % e recuperadas com Concreto Têxtil

Para as vigas com corrosão de 15 %, recuperadas com Concreto Têxtil, a curva deformada está ilustrada na Figura 87, comparando-as com as curvas deformadas das vigas corroídas (ao mesmo nível de corrosão) e testemunhos.

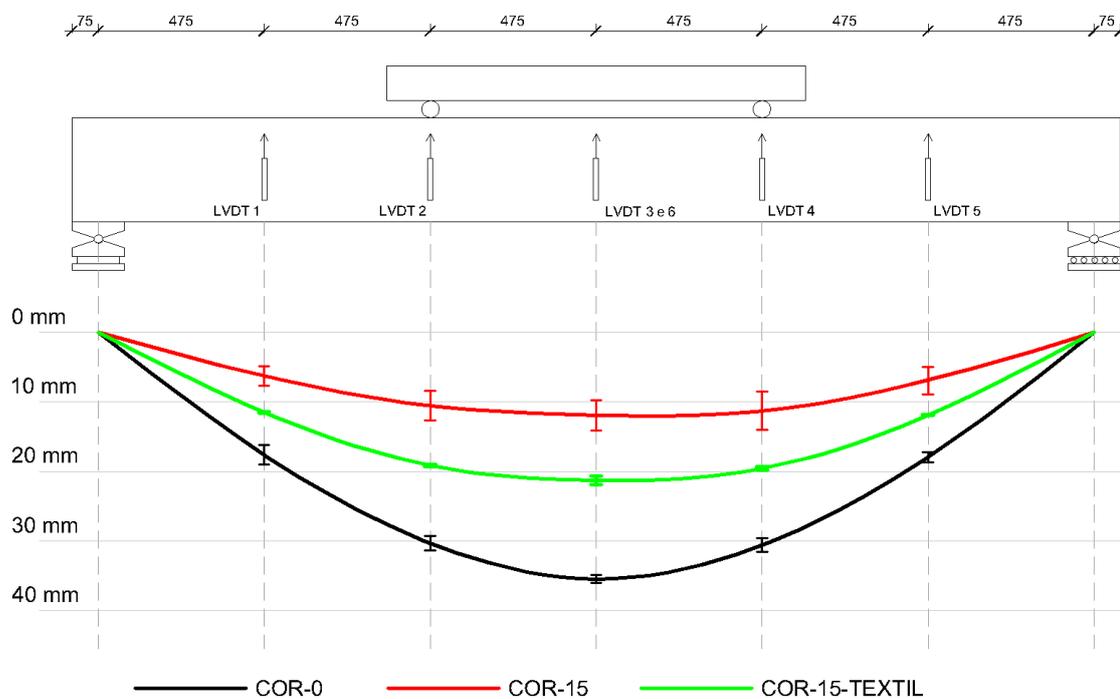


Figura 87: Curva deformada média para as vigas com corrosão de 15 % e recuperadas com Concreto Têxtil

Observa-se que as vigas recuperadas tiveram um comportamento diferente em relação às vigas com 15% de corrosão sem recuperação, apresentando uma curva deformada maior. Essa constatação é importante sob o ponto de vista estrutural, visto que a recuperação com Concreto Têxtil proporcionou um incremento das deformações comparado à viga corroída.

#### 4.7.4 Recuperação com Concreto Têxtil: análise das deformações específicas

A presença de um elemento de reforço conduz, naturalmente, a uma redução na deformação específica das armaduras. Porém, nas vigas recuperadas com Concreto Têxtil, este comportamento não foi verificado. Observou-se que o escoamento da armadura das vigas testemunhos ocorreu com a carga média de 72,2 kN e foi comparada à deformação específica desta carga para as vigas corroídas e recuperadas com Concreto Têxtil. O resultado das deformações específicas é ilustrado na Figura 88 que apresenta, para cada grupo de vigas, a média obtida. Observa-se que a recuperação das vigas corroídas com Concreto Têxtil se manteve estável em relação à deformação específica das armaduras, para um mesmo nível de carga.

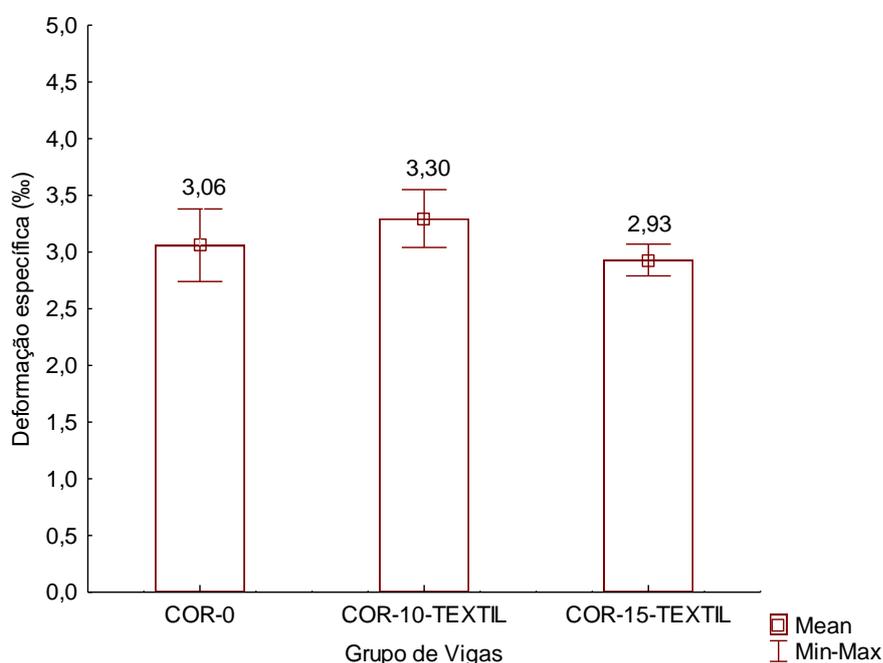


Figura 88: Deformações específicas médias das armaduras na carga de 72,2 kN

A fim de uma melhor compreensão do comportamento estrutural das vigas recuperadas, na Figura 89 é representado o diagrama carga x deformação específica das vigas testemunhos – Figura 89 (a); vigas com 10% de corrosão e recuperadas com Concreto Têxtil – Figura 89 (b); e vigas com 15% de corrosão e recuperadas com Concreto Têxtil – Figura 89 (c). As

deformações específicas apresentadas são relativas à seção transversal central, porém não, necessariamente, corresponde a seção de ruptura. Todavia, devido às características do ensaio de flexão (momento constante no terço médio e cisalhamento nulo), as deformações na seção central podem ser aproximadas as da seção de ruptura. Analisando as deformações representadas nos diagramas, em relação ao concreto, as deformações das vigas recuperadas com corrosão de 10% – Figura 89 (b) e de 15% – Figura 89 (c), apresentaram as deformações específicas do concreto compatíveis com a viga testemunho – Figura 89 (a) ficando com valor na ruptura próximo a 2,5 ‰

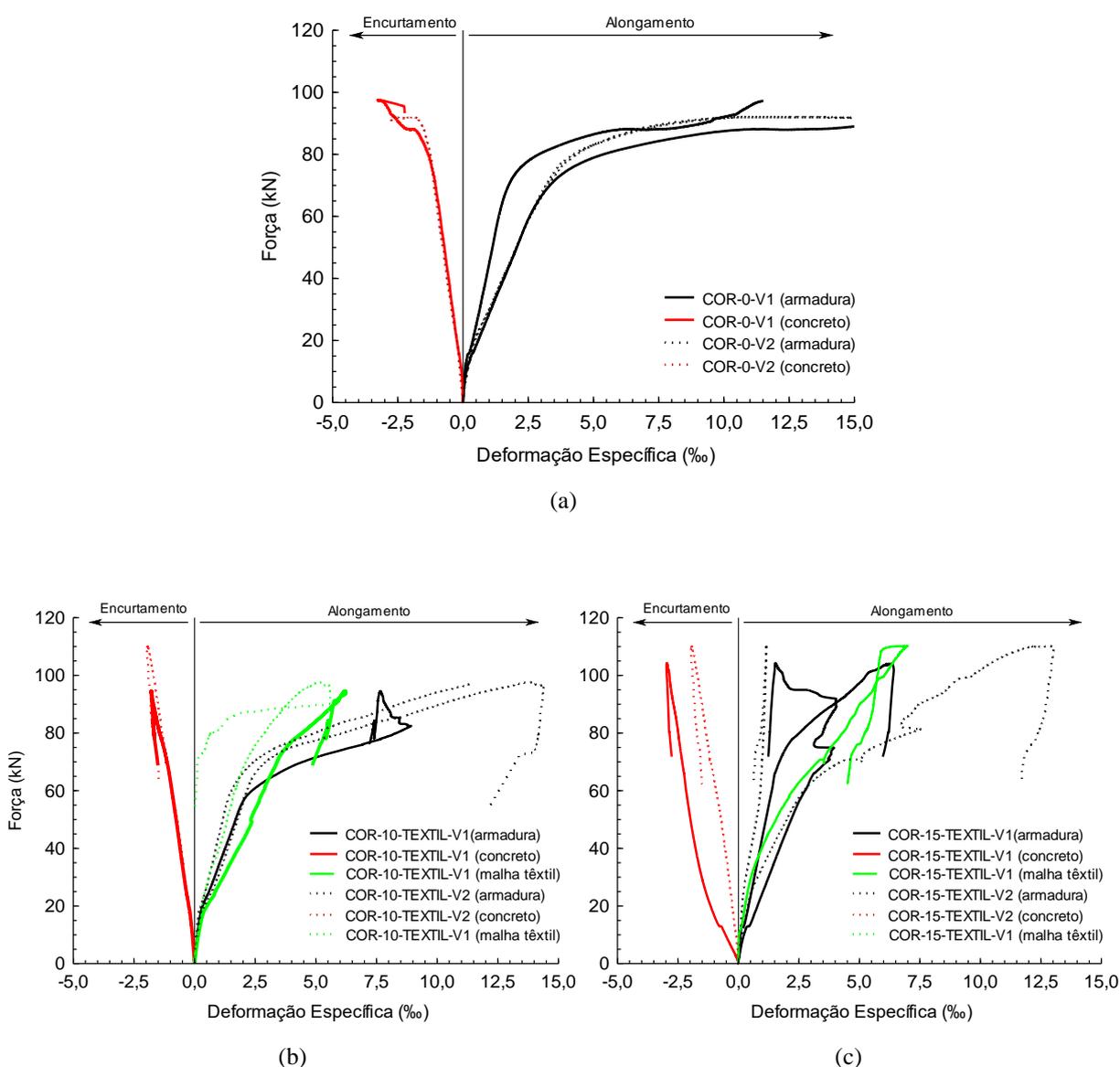


Figura 89: Diagrama carga x deformação específico das vigas testemunhos (a), vigas com 10% de corrosão e recuperadas com Concreto Têxtil (b) e vigas com 15% de corrosão e recuperadas com Concreto Têxtil (c)

Outro ponto que deve ser destacado foi a compatibilidade das deformações específicas entre as armaduras e malha têxtil. Observa-se a compatibilidade nas Figura 89 (b) e (c), indicando que houve uma aderência recíproca entre os materiais: da malha têxtil com a argamassa de recuperação e da argamassa com a armadura corroída. Além disto, através da análise do padrão de ruptura, é possível verificar que houve a propagação da fissura da camada de recuperação em Concreto Têxtil até a zona comprimida do concreto, indicando que há aderência entre a camada de recuperação e o concreto da viga.

#### 4.7.5 Recuperação com Concreto Têxtil: ductilidade na flexão

A avaliação da ductilidade na flexão, como já citado, foi desenvolvida a partir do proposto por Thompson e Park (1980) e Lee e Pan (2003). Os valores do deslocamento no escoamento do aço, para as vigas sem corrosão, foram determinados pela média do deslocamento quando a deformação específica das armaduras ( $\epsilon_s$ ) foi igual a 3,19 ‰. A deformação do aço foi monitorada através de extensômetro. Para as vigas corroídas, os valores do deslocamento no escoamento do aço foram determinados pela intersecção da deflexão da curva carga x deslocamento, conforme orientações de Thompson e Park (1980) e Lee e Pan (2003).

Na Figura 90, está apresentando o fator de ductilidade das vigas, obtido pela relação entre os deslocamentos correspondentes à carga de ruptura e o escoamento do aço, com indicação da média entre as vigas de cada grupo e respectivos valores mínimos e máximos. Os valores são apresentados para as vigas testemunhos, corroídas e corroídas recuperadas com Concreto Têxtil.

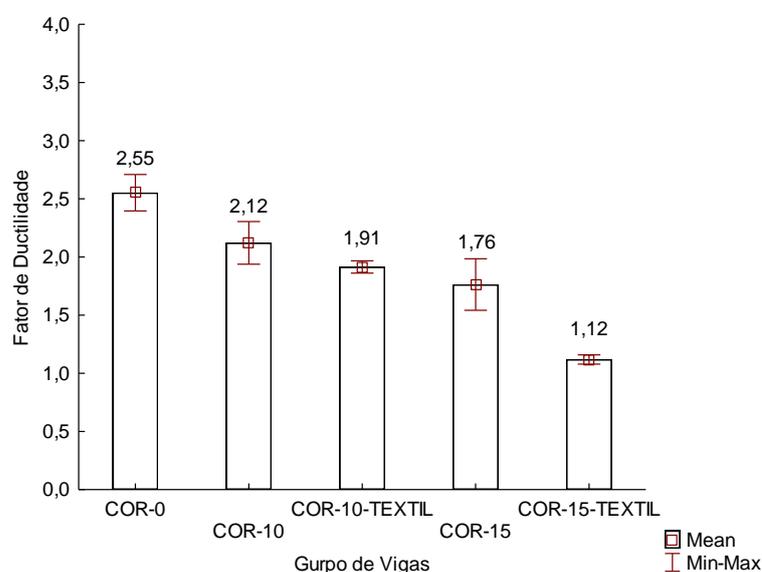


Figura 90: Fator de ductilidade para grupos de vigas recuperadas

Percebeu-se que houve uma redução no fator de ductilidade para as vigas corroídas, decrescendo conforme se eleva a corrosão, já discutido no item 4.5.4. Quando comparado o fator de ductilidade das vigas recuperadas com Concreto Têxtil, notou-se que há uma redução do fator de ductilidade em relação às vigas sem corrosão. Comparando a ductilidade das vigas recuperadas com as vigas corroídas, também é perceptível a redução da ductilidade: as vigas com corrosão de 10% recuperadas com Concreto Têxtil apresentaram ductilidade menor que as vigas corroídas. Isto, da mesma forma, ocorreu com as vigas recuperadas com Concreto Têxtil com 15% de corrosão. Essa redução da ductilidade já era esperada, uma vez que o têxtil é um material frágil, esse mesmo comportamento ocorreu nas vigas reforçadas dos estudos de Giese (2019).

#### 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO PROPOSTOS

Conhecidos os danos gerados pelo processo corrosivo nas vigas, foram avaliadas as respostas estruturais dos dois sistemas de recuperação propostos nessa tese. Em resumo, ambos proporcionaram ganhos consideráveis, sob o ponto de vista de carregamentos, em relação às vigas corroídas. Os resultados obtidos, em relação à carga máxima, são avaliados comparativamente entre os sistemas a fim de analisar estatisticamente os resultados obtidos.

Os resultados obtidos no estudo experimental são apresentados na Figura 91, relacionando a média da carga máxima suportada por cada conjunto de vigas analisados. Cada conjunto de vigas possui duas unidades, assim os resultados apresentados são em função da média, como já citado, e entre os valores mínimos e máximos. Como referência comparativa é utilizado o valor médio da carga máxima das vigas testemunhos, de 94,96 kN.

Evidencia-se que a corrosão afetou a capacidade de carga das vigas, reduzindo o seu valor à medida que grau de corrosão aumentava. Quanto às recuperações, observa-se que as vigas recuperadas com Concreto Têxtil apresentam os melhores desempenhos, indiferente do grau de corrosão das vigas recuperadas. A recuperação com UHPFRC, resultou em uma carga máxima próxima às vigas testemunhos, mas levemente inferior.

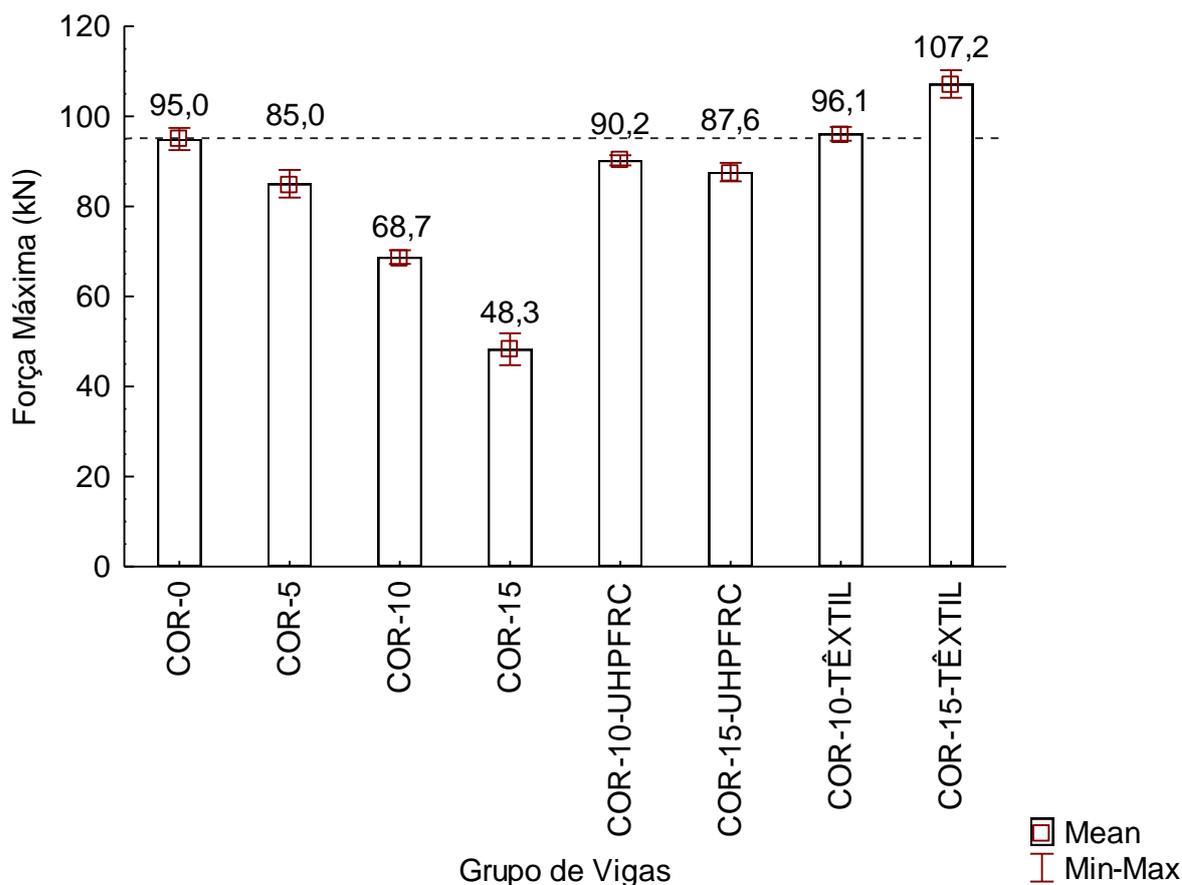


Figura 91: Média da força máxima para cada grupo de vigas

Com objetivo de avaliar estatisticamente os resultados, verificando efetivamente os sistemas de recuperação, bem como a corrosão nas vigas de concreto armado, os resultados foram analisados pelo método estatístico de análise de variância. Para esta análise estatística utilizou-se o software Statistica 13.5. A análise de variância foi realizada em dois conjuntos de dados: efeitos da corrosão sobre a capacidade portante das vigas de concreto armado e a comparação entre os tipos de recuperação. Em relação aos efeitos da corrosão, o resultado da análise de variância está apresentado na Tabela 21. Observa-se que a corrosão afetou de forma significativa a capacidade portante das vigas de concreto armado.

Tabela 21: Análise de variância para a capacidade portante em função da corrosão

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Grau de Corrosão	2500,67	3	833,56	54,906	0,104	S
Erro	60,72	4	15,18			

\* Para um nível de confiança de 95%  
S – significativo NS – não significativo

Conforme apresentado no item 4.5, os resultados dos efeitos da corrosão é perceptível no comportamento estrutural das vigas de concreto armado. No gráfico da Figura 92, apresenta-se

a análise de variância em relação à carga máxima e ao grau de corrosão. Considerando um intervalo de confiança de 95%, é possível afirmar que a corrosão afeta, significativamente, a capacidade estrutural das vigas de concreto armado, indiferentemente, do grau de corrosão. Observou-se que há uma redução proporcional da carga máxima em função do grau de corrosão das armaduras.

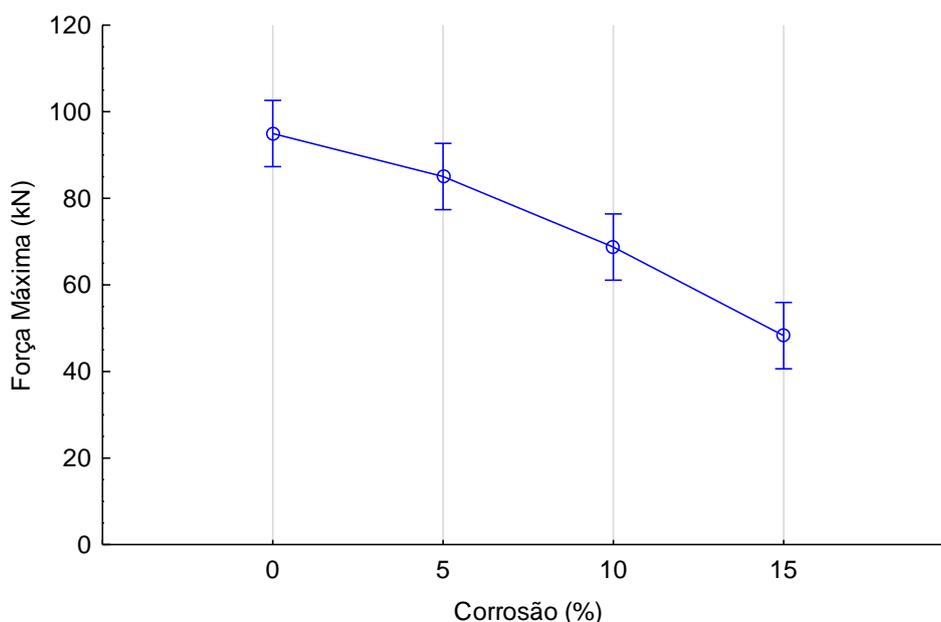


Figura 92: Síntese da análise de variância do grau de corrosão

Outro ponto analisado, através da análise de variância, está relacionado ao procedimento de recuperação em comparação às vigas testemunhos. Essa comparação foi realizada considerando o conjunto de vigas: sem recuperação às recuperadas com UHPFRC e com Concreto Têxtil. O objetivo da análise foi comprovar de forma estatística se há diferença entre os procedimentos de recuperações em relação às vigas testemunhos. A análise de variância está mostrada na Tabela 22.

Tabela 22: Análise de variância para a capacidade portante em função do procedimento de recuperação

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Procedimento de Recuperação	323,77	2	161,88	6,48	2,583	S
Erro	175,74	7	25,11			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

Verifica-se, pela análise de variância (Tabela 22), que o tipo de recuperação afetou de forma significativa a capacidade estrutural das vigas de concreto armado, considerando para isso um intervalo de 95% de confiança. Como houve diferença significativa entre os processos de

recuperação, complementarmente à análise de variância, determinou-se o limite de decisão, utilizado para a comparação dos procedimentos de recuperação. O limite de decisão para o conjunto de vigas analisados foi de 8,23 kN, determinado conforme a Equação 23:

Equação 23

$$LD = 3 X \sqrt{\frac{MQerro}{nc}}$$

Onde,

LD = Limite de decisão

$MQerro$  = Média quadrática do erro amostral

$nc$  = soma do número de amostras de cada variável, dividido pelo número de variáveis

A comparação das médias com o limite de decisão tem por objetivo determinar qual grupo de recuperação se difere, estatisticamente, em relação a outro. A comparação está apresentada na Tabela 23. A comparação das médias com o limite de decisão tem por objetivo determinar se há disparidade entre os níveis adotados para uma variável, quando há diferenças significativa entre eles. As comparações estão apresentada na Tabela 23: análise da média de ruptura das vigas testemunhos comparada, na comparação 1, com as recuperadas com UHPFRC e, na comparação 2, com as recuperadas com Concreto Têxtil; a comparação 3 compara os dois métodos de recuperação entre si. Se a diferença entre as médias for menor que o limite de decisão é possível afirmar que não há diferenças estatísticas entre os procedimentos comparados, todavia, se a diferença é maior é possível afirmar que há diferenças estatísticas entre os procedimentos.

Tabela 23: Comparação das médias da capacidade portante em função do procedimento de recuperação para o limite de decisão de 8,23 kN

Comparação 1		Comparação 2		Comparação 3	
Recuperação	Média	Recuperação	Média	Recuperação	Média
Referência	94,96 kN	Referência	94,96 kN	Concreto Têxtil	101,65 kN
UHPFRC	88,93 kN	Concreto Têxtil	101,65 kN	UHPFRC	88,93 kN
Diferença	6,06 kN	Diferença	-6,69 kN	Diferença	12,72 kN
Não há diferenças estatísticas*				Há diferenças*	

\* Para um limite de decisão de  $\pm 8,23$  kN

Através da comparação das médias com o limite de decisão é possível afirmar que não houve diferenças na capacidade estrutural entre a viga testemunho (sem corrosão) em comparação com as vigas corroídas recuperadas tanto com UHPFRC quanto com Concreto Têxtil. Indicando, portanto, que foi possível reabilitar a capacidade estrutural das vigas corroídas com ambas as técnicas propostas nessa tese.

Porém, houve diferença estatística entre os procedimentos de recuperação, indicando que a recuperação com Concreto Têxtil possibilitou melhor desempenho, quanto a capacidade estrutural, se comparado com a recuperação com UHPFRC. Na Figura 93, é apresentado, de forma gráfica, a relação, entre a média e o desvio padrão, dos resultados obtidos na comparação entre os dois procedimentos de recuperação aplicados nas vigas corroídas e as vigas sem corrosão (referência).

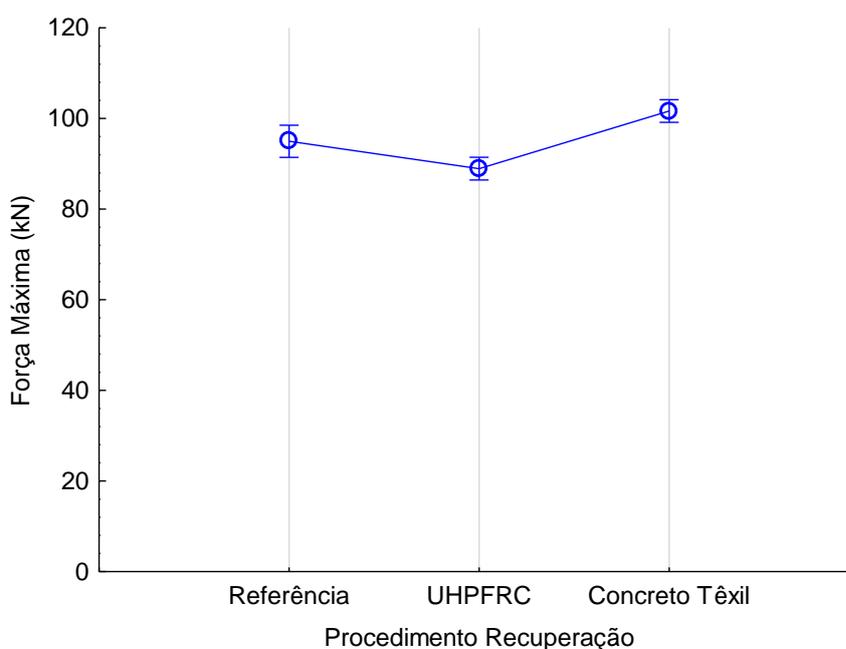


Figura 93: Médias da carga máxima em relação aos procedimentos de recuperação

Sob outra perspectiva, os dados foram avaliados em relação ao grau de corrosão recuperado quando as vigas recuperadas são comparadas às vigas sem processo corrosivo. O objetivo da análise foi comprovar, de forma estatística, se há diferença entre os graus de corrosão recuperados 10 e 15% em relação às vigas sem corrosão. A análise de variância está apresentado na Tabela 24.

Tabela 24: Análise de variância para a capacidade portante em grau de corrosão recuperado

Efeito	SQ	GL	MQ	F	P (%)	Significância *
Grau de Corrosão Recuperado	35,70	2	17,85	0,269	77,14	NS
Erro	463,80	7	66,26			

\* Para um nível de confiança de 95%

S – significativo NS – não significativo

Verifica-se, pela análise de variância (Tabela 24), que independente do grau de corrosão a que as vigas estavam submetidas, foi possível reabilitar a capacidade estrutural para o patamar das vigas sem processo corrosivo. Na Figura 94, é apresentada a relação da carga máxima e o grau de corrosão recuperado, comparando as vigas sem corrosão.

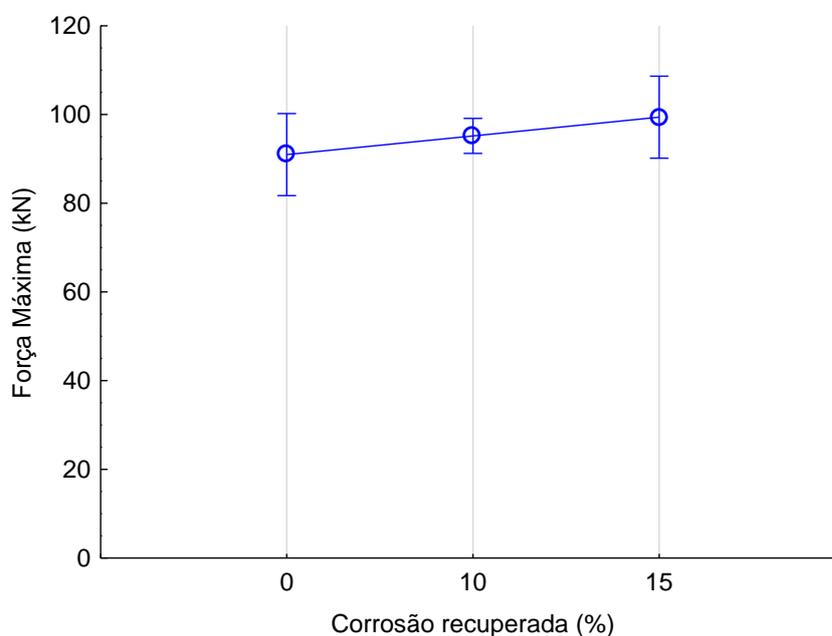


Figura 94: Síntese da análise de variância do grau de corrosão das vigas recuperadas

Assim, finalizadas as análises dos resultados experimentais, pode ser afirmado que, independentemente, do grau de corrosão (10 e 15%) foi possível reabilitar a capacidade estrutural das vigas corroídas, tendo como referência os resultados das vigas sem corrosão.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre a avaliação dos efeitos da corrosão em vigas de concreto armado, juntamente com a análise das técnicas para diagnósticos da corrosão e a verificação dos procedimentos de recuperação propostos nessa tese. São apresentadas as conclusões, frente as análises detalhadas no capítulo anterior, e, por fim, as sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa realizou avaliação das técnicas para diagnóstico da corrosão, análise dos efeitos da corrosão em vigas de concreto armado e aplicação de dois procedimentos de recuperação através de ensaios experimentais em escala real. Ensaios com essa característica são onerosos, tanto em termos financeiros quanto em relação a mobilização necessária para o seu desenvolvimento.

Sabendo-se que os estudos experimentais possuem por característica, muitas vezes intrínsecas, a alta variabilidade dos resultados, e, no que diz respeito à avaliação da corrosão por métodos acelerados, se tem notícia de resultados bastante díspares em alguns estudos . Desta forma, o desenvolvimento de todas as etapas experimentais desta pesquisa foram planejadas de forma pormenorizada, buscando ser muito meticulosa, desde o posicionamento dos eletrodos de corrosão até a execução dos ensaios de flexão nas vigas de concreto armado.

Muitas variáveis poderiam interferir no processo de aceleração, avaliação e reabilitação da corrosão, portanto, dentro do possível, buscou-se o controlar as variáveis que poderiam afetar os resultados relativos aos objetivos propostos. Em relação às variáveis controladas foi possível considerar que:

- a) limitações na possibilidade de produção simultânea de todas as vigas de concreto armado levaram ao preparo do concreto para determinados lotes de para moldagem das vigas analisadas no programa experimental simultaneamente;
- b) por limitação da capacidade de mistura do UHPFRC o processo de recuperação foi realizado viga a viga;
- c) por limitação da capacidade de mistura da argamassa do processo de recuperação com Concreto Têxtil, as vigas foram individualmente recuperadas;

- d) apesar destas limitações de quantidade de mistura por vez, considerou-se que as propriedades dos concretos e da argamassa preparados não interferiram na comparação das vigas sem corrosão, vigas corroídas e das vigas corroídas recuperadas.

Estas limitações sobre as variáveis controladas são detalhadas nos parágrafos a seguir recuperando o que foi descrito ao longo desta tese.

As limitações devido a produção das vigas de concreto armado impossibilitaram a moldagem de todas as vigas analisadas no programa experimental simultaneamente. Como relatado no programa experimental, foram moldadas cinquenta vigas, dezesseis delas foram utilizadas na presente pesquisa. A execução das vigas foi dividida em seis concretagens, todas com as mesmas características e mesmos materiais sendo empregados. A resistência à compressão foi adotada como parâmetro de controle das vigas e, pela análise de variância, foi constatado que não houve interação significativa entre a idade e as diferentes concretagens. Assim, considerou-se que todas as vigas rompidas à flexão não apresentaram diferenças estatísticas em relação ao concreto utilizado, assumindo que todas são estatisticamente equivalentes. Em relação ao módulo de elasticidade do concreto, também foi constatado que não houve interferência significativa entre a idade de ruptura e as diferentes concretagens, sustentando a hipótese que todas as vigas são estatisticamente equivalentes. Portanto, a resistência à compressão do concreto na idade de ruptura das vigas foi de 32,4 MPa e o módulo de elasticidade de 34,8 GPa.

Por limitação da capacidade de mistura, o processo de recuperação das vigas foi realizado individualmente. Para o UHPFRC, utilizou-se a resistência à compressão e o módulo de elasticidade como parâmetros de controle. Através da análise de variância, foi constatado que não houve diferenças estatísticas entre os parâmetros de controle. Portanto, estatisticamente, foi considerado que todas as vigas recuperadas com UHPFRC apresentaram propriedades do material de recuperação equivalentes, sendo a resistência à compressão de 136,6 MPa e módulo de elasticidade de 48,5 GPa na ruptura destes elementos estruturais.

Frente a limitação da capacidade de mistura, o processo de recuperação com Concreto Têxtil também foi realizado individualmente. Para o Concreto Têxtil foram utilizadas as propriedades da argamassa como parâmetros de controle, sendo elas a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão. Através da análise de variância, foi constatado que não houve diferenças estatísticas entre os parâmetros de controle. Portanto, estatisticamente, foi considerado que todas as vigas recuperadas com Concreto Têxtil apresentaram propriedades do material de

recuperação equivalentes, sendo as resistências à compressão de 65,5,5 MPa e, à tração na flexão de 4,44 MPa na idade de ruptura das vigas.

Em relação ao processo de aceleração da corrosão foi possível considerar que:

- a) a técnica de corrosão acelerada, nas vigas de concreto armado, através do ensaio CAIM mostrou-se bastante eficaz;
- b) os valores médios dos graus de corrosão real ficaram próximos aos valores teóricos e aos definidos na elaboração do programa experimental;
- c) a variação do grau de corrosão para os diferentes grupos de recuperação, através análise de variância, não foi significativa.

Estas considerações sobre processo de aceleração da corrosão são detalhadas nos parágrafos a seguir conforme, anteriormente, descrito na tese.

Com o uso do ensaio CAIM, verificou-se que a técnica de corrosão acelerada nas vigas de concreto armado foi bastante eficaz. O ajuste do tempo de corrosão através da metodologia proposta por Graeff (2007), com valores apresentados por Stein (2019), proporcionou uma relação linear e significativa entre o grau de corrosão teórico e valor real (obtido experimentalmente), indicando que o procedimento de aceleração da corrosão adotado nessa pesquisa se demonstrou adequado para a aceleração do processo corrosivo.

As análises dos resultados demonstraram que os valores médios dos graus de corrosão real ficaram próximos aos teóricos e aos definidos no programa experimental. Através da análise de variância, foi possível distinguir estatisticamente os diferentes grupos de corrosão, devido aos resultados estatísticos significativos. Portanto, foram utilizados para análise dos efeitos do processo corrosivo, nas vigas de concreto armado, os graus de corrosão representativos de cada um dos grupos sendo eles de 5 %, 10 % e 15 %, podendo ser comparados separadamente, visto a diferença significativa entre eles.

A análise de variância detectou não ser significativo o grau de corrosão para os diferentes grupos de recuperação, ou seja, vigas: testemunhos, recuperadas com UHPFRC e com concreto têxtil. Portanto, para um mesmo nível de corrosão, puderam ser comparados os dois processos de recuperação, incluindo as vigas testemunhos (sem corrosão) e as corroídas.

Por fim, para as conclusões foi possível considerar que:

- a) não houve diferenças entre as vigas concretadas separadamente;
- b) não houve diferenças entre as características do material de recuperação preparados e aplicados separadamente;
- c) há diferenças entre os grupos de corrosão considerados (5%, 10% e 15%);
- d) não há diferenças no grau de corrosão, quando comparados os diferentes procedimentos de recuperação, inclusive com as vigas sem processo de recuperação (testemunhos).

Logo, as considerações finais apresentadas acima corroboram para as conclusões obtidas nessa pesquisa e que são apresentadas na sequência.

## 5.2 CONCLUSÕES

A seguir são descritas as conclusões que puderam ser estabelecidas nessa pesquisa relativas à avaliação da aceleração da corrosão, às técnicas para diagnóstico da corrosão, bem como os efeitos da corrosão em vigas de concreto armado e quanto a aplicação dos procedimentos de reabilitação.

A técnica de corrosão acelerada nas vigas de concreto armado, através do ensaio CAIM, foi eficiente, indicando que o procedimento de aceleração da corrosão adotado nessa pesquisa foi adequado para a aceleração do processo corrosivo nas vigas de concreto armado.

Quanto às técnicas de diagnósticos da corrosão por ensaios não destrutivos, em relação ao potencial de corrosão, conclui-se que houve uma incerteza na aferição da corrosão, para os níveis de 5 e 10%. Ambos tiveram o potencial de corrosão dentro da mesma faixa de leitura e classificados com um probabilidade de 50% de haver corrosão. Assim, somente para a corrosão de 15% o método do potencial de corrosão foi eficaz. Desta forma, conclui-se que o ensaio de potencial de corrosão não apresenta resultados ideais, porém pode ser utilizado para o diagnóstico da corrosão, desde que empregado com cautela, visto que pode apresentar resultados potencialmente frágeis. Em relação às técnicas de diagnóstico, através da resistividade e taxa de corrosão, conclui-se que ambas se apresentaram mais adequadas para o diagnóstico da corrosão indicando, para todos os níveis de corrosão adotados (5, 10 e 15%), alta probabilidade de corrosão.

Através da análise de variância, relacionando o nível de corrosão e a capacidade portante das vigas de concreto armado, foi possível concluir que a corrosão afetou de forma significativa o

desempenho das vigas de concreto armado, independentemente do nível de corrosão, modificando o seu comportamento estrutural. Além disso, conclui-se que a corrosão reduziu a ductilidade das vigas de concreto armado corroídas.

Em relação a recuperação das vigas corroídas com UHPFRC, através da comparação das médias com o limite de decisão, foi possível concluir que não houve diferenças estatísticas entre a viga testemunho (sem corrosão) em comparação com as vigas corroídas recuperadas por este método. Desta forma, foi possível reabilitar o desempenho estrutural das vigas corroídas com a aplicação do UHPFRC, independentemente, do nível de corrosão.

Analisando a recuperação das vigas corroídas com Concreto Têxtil, através da comparação das médias com o limite de decisão, foi possível concluir que não houve diferenças estatísticas entre a viga testemunho (sem corrosão) em comparação com as vigas corroídas recuperadas pelo método. Assim, foi possível reabilitar o desempenho estrutural das vigas corroídas com a aplicação do Concreto Têxtil de forma independente ao nível de corrosão apresentado pelas vigas.

Na comparação entre os métodos de recuperação propostos, conclui-se que houve diferenças estatísticas entre os eles, indicando que a recuperação com Concreto Têxtil possibilitou melhor desempenho comparativamente aquelas com UHPFRC.

Por fim, através da análise de variância, conclui-se que independente do grau de corrosão a que as vigas estavam submetidas, foi possível reabilitar o desempenho estrutural para o patamar das vigas sem processo corrosivo.

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Registra-se, por fim, algumas sugestões de trabalhos a serem desenvolvidos para dar continuidade e complementação à pesquisa apresentada nesta tese:

- a) avaliação do efeito da escala na técnica de aceleração da corrosão, possibilitando a aplicação desta em elementos de menor dimensão;
- b) desenvolvimento de uma metodologia para prever a perda de massa simultaneamente à realização do ensaio de corrosão acelerada;
- c) avaliação da recuperação com UHPFRC e Concreto Têxtil em outros elementos de concreto armado (lajes, pilares), bem como diferentes taxas de armaduras.

## REFERENCIAL TEÓRICO

ADAMATTI, D. S. **Análise da eficiência de espaçadores no concreto armado: impacto da corrosão por íons cloreto em diferentes condições de exposição.** 2016.

130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

AGUERO, R. R. **Estudio experimental y numérico de vigas usando ultra-high performance reinforced concrete (UHPFRC).** 2019. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

AHN, W.; REDDY, D. V. Galvanostatic testing for the durability of marine concrete under fatigue loading. **Cement and Concrete Research.** v. 31, p. 343–349, 2001.

ALDEA, C.; GRIES, T.; ROYE, A. 2 Definitions. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report.** Bagneux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 5-9

ALMUSALLAM, A. A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. **Construction and Building Materials.** Vol. 15, pp. 361-368, 2001.

ALMUSALLAM, A. A. *et al.* Effect of reinforcement corrosion on bond strength. **Construction and Building Materials.** Vol. 10, no.2, pp. 123-129, 1996.

ALSALMAN, A. *et al.* Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials,** 2017. v. 153, p. 918–928. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual book of ASTM Standards. **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens.** ASTM G1-03. Philadelphia, 2017.

\_\_\_\_\_. **C876-15,** Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

AMLEH, L.; MIRZA, S. Corrosion influence on bond between steel and concrete. **ACI Structural Journal.** Vol. 96, no. 3, pp. 415-423, 1999..

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras.** São Paulo: PINI, 1992. 104p.

\_\_\_\_\_. ALONSO, C.; GULIKERS, J. *et al.* Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization

resistance method. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 2004. v. 37, n. 273, p. 623–643.

ANDRADE, J. J. De O. **Estruturas De Concreto Armado Atacadas Pela Corrosão De Armaduras : Iniciação Por Cloretos**. 2001. 277f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ANDRIOTTI, José Leonardo Silva. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo, RS: Unisinos. 2ª reimpressão, 2009

APOSTOLOPOULOS, C. A. Mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore under low cycle fatigue. **Construction and Building Materials**, 2007. v. 21, n. 7, p. 1447–1456.

\_\_\_\_\_, C. A; PAPADOPOULOS, M. P.; PANTELAKIS, S. G. Tensile behavior of corroded reinforcing steel bars BSt 500s. **Construction and Building Materials**, 2006. v. 20, n. 9, p. 782–789.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019

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

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência:, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais e pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2015 Versão Corrigida:2016, Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

2015 Versão Corrigida:2016, Rio de Janeiro, 2016.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. 2009 Versão Corrigida:2019, Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 7212:** Execução de concreto dosado em central – procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 9062:** Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono.** 2003. p. 317. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. **Corrosion of Steel in Concrete Prevention, Diagnosis, Repair** . WILEY-VCH Verlag, 2004, 394 p.

BEUTEL, R.;REINHARDT, H.; GROSSE, C. U.; et. al. **Performance Demonstration of Non-Destructive Testing Methods.** In: European Ndt Conference (ECNDT 2006), 9, 2006, Berlin. Proceedings.... Berlin: The German Society for Non-Destructive Testing, 2006. Disponível em: <http://www.ndt.net>.

BIZ, Carlos Eduardo. **Concreto de Pós Reativos.** 2001. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

BONNEAU, O. Reactive powder concretes: from theory to practice. **Journal Concrete International**, n.18 (4), 1996; pp. 47-49

BOSHOFF, W.P.; ZIJL, G. P. A. G. **Time-dependent response of ECC: characterization and modeling of creep and creep fracture.** In: International RILEM Workshop on HPFRCC in Structural Applications, Honolulu 23-26 may 2005. USA: RILEM Publications, PRO 49, 125-134

BRAMESHUBER, W. **Report REP036: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report.** RILEM Technical Committee TC 201- TRC: Textile Reinforced Concrete. 2006. 292 p.

\_\_\_\_\_. BROCKMANN, T. Concrete/matrix. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 29-56.

BRÜCKNER, A., ORTLEPP, R., CURBACH, M., Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear, **Materials and Structures**, 39, 741–748, 2006.

CABRERA, J. G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. **Cement and Concrete Research**. Vol. 18, pp. 47-59, 1996.

CAETANO, L. F. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CAPRILI, S.; SALVATORE, W. Cyclic behaviour of uncorroded and corroded steel reinforcing bars. **Construction and Building Materials**. v. 76. 2015. Pages 168-186.

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

CASTEL, A.; FRANÇOIS, R.; ARLIGUIE, G. Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams - Part 1: experimental study of corroded beams. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 2000. v. 33, n. 9, p. 539–544.

CHO, Y. S., Non-destructive Testing of High Strength Concrete using Spectral Analysis of Surface Waves. **NDT&E International**. n. 36, p. 229-235, 2003

CHOI, Y. S. *et al.* Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens. **Construction and Building Materials**, 2014. v. 54, p. 180–189.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de Pós-Reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos –, São Leopoldo, 2014.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB 192**: Diagnosis and Assessment of Concrete Structures - State-of-Art Report. Bulletin d' Information, Suecis, n. 192, jan 1988.

CORONELLI, D *et al.* Modelling of Corroding Concrete Structures. **RILEM Bookseries**, 2011. v. 5, p. 195–205.

\_\_\_\_\_. Corrosion Cracking and Bond Strength Modeling for Corroded Bars in Reinforced Concrete. **Structural Journal**, 2002. v. 99, n. 3.

DENARDI, A. **Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016. p. 108.

DENARIÉ, E.; BRIIHWILER. Structural rehabilitations with Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC). **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting** - Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2005, 2006. v. 12, n. 5, p. 22–24.

DONNINI, J.; CORINALDESI, V.; NANNI, A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different. **Composites Part B: Engineering**, v. 88, 1 março 2016. 220–228. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012>>

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

EL MAADDAWY, T. A.; SOUDKI, K. A. Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 1, p. 41–47, 2003.

ELGHAZY, M *et al.* Corrosion-Damaged RC Beams Repaired with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix. **Journal of Composites for Construction**, 2018b. v. 22, n. 5.

ELGHAZY, M. *et al.* Post-repair flexural performance of corrosion-damaged beams rehabilitated with fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM). **Construction and Building Materials**, 2018a. v. 166, p. 732–744.

EL-REEDY, M. A. **Steel-Reinforced Concrete Structures: Assessment and Repair of Corrosion**. 2<sup>a</sup> ed. New York: Taylor & Francis Group, 2018.

ELSENER, B., ANDRADE, C., GULIKERS, J. *et al.* **Half-cell potential measurements** -Potential mapping on reinforced concrete structures. *Mat. Struct.* 36, 461–471. 2003

FANG, C. *et al.* Corrosion influence on bond in reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, 2004. v. 34, n. 11, p. 2159–2167.

FÁVERO, R. B. **Caracterização mecânica de material compósito cimentício avançado à base de pós reativos**. 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Structural Behavior of Ultra- High Performance Concrete Prestressed I-Girders**. Publication no.FHWA-HRT-06- 115. McLean, VA: FHWA. 2006.

FERNANDEZ, I.; BAIRÁN, J. M.; MARÍ, A. R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and  $\sigma$ - $\varepsilon$  behavior. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 772–783, 2015.

FU, X.; CHUNG, D. D. L. **Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar**. Cement and Concrete Research. Vol. 27, no. 12, pp. 1811-1815, 1997.

GAO, Y.; ZHENG, Y.; ZHANG, J.; XU, S.; ZHOU, X. e ZHANG, Y. Time-dependent corrosion process and non-uniform corrosion of reinforcement in RC flexural members in a tidal environment. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 79-90, 2019.

GARCEZ, M. R. Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras. 2007. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GEHLEN, C.; WEIRICH, T. High-cycle fatigue behaviour of reinforcing steel under the effect of ongoing corrosion. **Structural Concrete**. v. 17, n. 3, p. 329–337, 2016.

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2019. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2019.

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

GRAYBEAL, B. **Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete**. Federal Highway Administration, Report No.FHWA-HRT-06-103, August 2006, 186 p

\_\_\_\_\_ BABY, F. Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, 2013. v. 110, p. 177–186.

\_\_\_\_\_ RUSSEL, G, H. Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the **Bridge Community**. 2013. n. June, p. 171.

GRIES, T. *et al.* 3 Textiles. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 11-27.

HABEL, K. **Structural Behaviour Of Elements Combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC) And Reinforced Concrete**. 2004. 222 f. Faculté Environnement Naturel, Architectural Et Construit - Institut de Structures: École Polytechnique Fédérale De Lausanne. Lausanne, Suíça.

HÁJKOVÁ, K.; SMILAUER, V.; JENDELE, L. e CERVENKA, J. Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. **Engineering Structures**, v. 174, p. 768-777, 2018.

HANJARI, K. Z.; CORONELLI, D.; LUNDGREN, K. **Modelling of Corroding Concrete Structures**. RILEM Bookseries, 2011. v. 5. 283 p.

HEGGER, J. *et al.* 6.2 Mechanical behaviour of textile reinforced concrete. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 133-183.

\_\_\_\_\_. VOSS, S. Textile reinforced concrete under biaxial loading. **6th Rilem Symposium on Fiber Reinforced Concrete (FRC), BEFIB 2004**, 2004. n. September, p. 1463–1472.

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

\_\_\_\_\_. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1986. 46p.

HUSSEIN, L.; AMLEH, L. Size effect of ultra-high performance fiber reinforced concrete composite beams in shear. **Structural Concrete**, 2018. v. 19, n. 1, p. 141–151.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6241**: Performance standards in building— Principles for their preparation and factors to be considered. 1984 (revista e aprovada em 2010).

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – JSCE. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE- SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. N° 3 June 1984. p.58-61.

KANCHANA D. A.; RAMAJANEYULU, K.; SUNDARKUMAR, S. *et al. et al.* Ultimate Load Behaviour of Reinforced Concrete Beam with Corroded Reinforcement. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, 2017. v. 98, n. 4, p. 525–532.

KASHANI, M. M.; ALAGHEBAND, P.; KHAN, R. *et al.* Impact of corrosion on low-cycle fatigue degradation of reinforcing bars with the effect of inelastic buckling. **International Journal of Fatigue**, v. 77, p. 174–185, 2015.

KIRCHHEIM, A. P.; PASA, V.; DAL MOLIN, D.; SILVA FILHO, L. C. P. **Análise comparativa da utilização de diferentes sistemas de proteção de corrosão de armaduras na aderência entre concreto branco e barras de aço**. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais... Vol. VII – Métodos de Proteção, Reforço e Reparo de Estruturas de Concreto, Recife, 2005.

KÖCKRITZ, U. *et al.* **Innovative technology for the manufacture of textile reinforcements for concrete.** 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTRC). RILEM Publications SARL. 2006. p. 3-12..

LARRINAGA P. *et al.* Experimental study of the flexural behaviour of low performance RC beams strengthened with textile reinforced mortar. **RILEM Proceedings**, 2010. v. 75, p. 235–244.

LEE, T. K.; PAN, A. D. E. Estimating the relationship between tension reinforcement and ductility of reinforced concrete beam sections. **Engineering Structures**, 2003. v. 25, n. 8, p. 1057–1067.

LI, S. BIN; TANG, H. W.; WANG, X. Fatigue Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams-a Review. **Applied Mechanics and Materials**, v. 94–96, p. 1523–1526, 2011.

LIMA, M. G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão de armaduras.** 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

LORENZI, A. ; REGINATO, L. A. ; LORENZI, L. S. ; PEDRON, F. ; SILVA FILHO, L. C. P. . **Utilização de Tomografia Ultrassônica para Avaliação de Postes de Concreto após Sinistro.** In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, 2015, Lisboa. Anais do XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, 2015.

MA, J.; ORGASS , M.; DEHN, F. *et al.* Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with or without Coarse Aggregates. **Proceedings of the international symposium on ultra high performance concrete, Kassel**, 2004. n. September, p. 205–212.

MARCHESAN, P. R. C.; SANTAROSA, D.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P.; PACHECO, A. R. **Estudo da influência da aplicação de revestimentos no controle da corrosão.** In: IV Congresso Iberoamericano De Patologia Das Construções e VI Congresso De Controle Da Qualidade. Anais... Porto Alegre: LEME/CPGEC/UFRGS, 1997.

MASSICOTTE, B.; BOUCHER-PROULX, G. **Chapter 35. Seismic Retrofitting of Bridge Piers with UHPFRC Jackets.** In: RESPLENDINO, J.; TOULEMONDE, F. Designing and Building with UHPFRC. Wiley-ISTE, 2011. p. 531 -540.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.**São Paulo: IBRACON, 2014.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado: ensaios eletroquímicos.** IFPB, 130 p. 2017.

MORASSUTTI, D. S. **Passarela em Concreto Armado e Concreto Têxtil: comparativo entre metodologias de dimensionamento.** Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre:

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016. p. 87.

NORA, J. **Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018. p. 118.

ORTLEPP, R.; ORTLEPP, S.; CURBACH, Manfred.

Stress transfer in the bond joint of subsequently applied textile reinforced concrete strengthening. **6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes**, 2004. n. September, p. 1483–1494.

OU, Y. C.; SUSANTO, Y. T. T.; ROH, H. Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars. **Construction and Building Materials**, 2016. v. 103, p. 93–104. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.075>>.

PELED, A.; BENTUR, A.; MOBASHER, B. **Textile Reinforced Concrete**. 1ª. ed. Londres: CRC Press, 2017. 489 p.

RAMBO, D. A. S. **Efeito da temperatura no comportamento mecânico de compósitos refratários reforçados com tecidos de basalto e carbono**. Tese de doutorado. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia. 2016. p. 228.

REGINATO, L. A. **Emprego do modelo teórico de empacotamento de partículas para dosagens de concreto de pós reativos e análise das propriedades mecânicas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Joaçaba: Universidade do Meio Oeste Catarinense. 2011. p. 129.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão E Degradação Em Estruturas De Concreto**. Elsevier, 2018. 416 p.

\_\_\_\_\_. CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. *In*: RIBEIRO, Daneil Vêras (Org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 2014. p. 87–118.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, 1995. v. 25, n. 7, p. 1501–1511.

RILEM TC 162 – TDF: **Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Bending Test** (final recommendation). *Materials and Structures*, Vol. 35, nov., 2002, p 579-582.

RODGERS, J. L.; NICEWANDER, W. A. **Thirteen ways to look at the correlation coefficient**. *The American Statistician*. v.42 p. 59–66. 1988

SCHLADITZ, F., FRENZEL, M., EHLIG, D., CHURBACH, M., Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete. **Engineering**

**Structures**, v.40, 317–326, 2012.

SELISTRE, S. C.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L. **Estudo de técnicas para reversão do processo corrosivo em estruturas de concreto contaminadas com cloretos**. In: VI SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E III FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Anais... Porto Alegre: UFRGS, 1994.

SIMON, A. **Chapter 48: New AFGC Recommendations on UHPFRC: 1 – Mechanical Characteristics and Behavior of UHPFRC**. In: RESPLENDINO, J.; TOULEMONDE, F. *Designing and Building with UHPFRC*. Wiley-ISTE, 2011. p. 723 -742.

STANISH, K.; HOOTON, R. D.; PANTAZOPOULOU, S. J. Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete. **ACI Structural Journal**, 1999. v. 96, n. September.

STEIN, K. J. **Avaliação experimental de vigas de concreto armado corroídas submetidas a ciclos de carregamentos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e infraestrutura. Porto Alegre. 2019

STOICA, O. M. **La production d'éléments fabriqués en béton de poudres réactives**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Université de Sherbrooke. Montreal. Canadá.1996.

THIBAU, T. **Chapter 37. Using UHPFRC for Structural Reinforcement of Buildings and Civil Works**. In: RESPLENDINO, J.; TOULEMONDE, F. *Designing and Building with UHPFRC*. Wiley-ISTE, 2011. p. 553 - 566.

THOMPSON, K. J.; PARK, R. Ductility of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beam Sections. **Journal of the Prestressed Concrete Institute**, 1980. v. 25, n. 2, p. 46–70.

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

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research, Fo n° 504, p. 469, 1982.

VANDERLEI, Romel Dias. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VARELA, H.; ESPINOZA, L. V. **Penetrabilidad De Iones Cloruors En Morteros Con Y**

**Sin Revestimiento.** In: VII Jornadas Chilenas Del Hormigón E I Jornada Lationamericana Del Cimento Y Hormigón, Curso: Avances Tecnologicos En El Uso De Cementos Y Hormigones, 1988, Santiago De Chile. Anais... Santiago De Chile: Instituto Profesional De Santiago, 1988.

VOO, Y. L. *et al.* Application of ultra high performance fiber reinforced concrete – the malaysia perspective. **International Journal of SuSteinable Construction Engineering & Technology**, 2012. v. 3, n. 1, p. 26–44.

YUAN, Y.; JI, Y. e JIANG, J. Effect of corrosion layer of steel bar in concrete on time-variant corrosion rate. **Materials and Structures**, v. 42, p. 1443-1450, 2009.

ZHANG, W. *et al.* Tensile and fatigue behavior of corroded rebars. **Construction and**

**ZHU, W. Effect of corrosion on the mechanical properties of the corroded reinforcement and the residual structural performance of the corroded beams.** Civil Engineering. INSA de Toulouse, 2014.