



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de fibras de garrafa PET (politereftalato de etila), submetidas a corrosão acelerada pelo método CAIM

Eduardo Augusto Saraiva Bageston

Lajeado, novembro de 2020



Eduardo Augusto Saraiva Bageston

Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de fibras de garrafa PET (politereftalato de etila), submetidas a corrosão acelerada pelo método CAIM

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

Orientadora: Profa Ma. Débora Pedroso Righi

Lajeado, novembro de 2020

Eduardo Augusto Saraiva Bageston

Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de fibras de garrafa PET (politereftalato de etila), submetidas a corrosão acelerada pelo método CAIM

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Débora Pedroso Righi –orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Ma. Carolina Becker Pôrto Fransozi
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Dra. Bruna Horta Bastos Kuffner
Universidade Federal de Itajubá - Unifei

Lajeado, 26 de novembro de 2020

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Adão e Alexandra, por todo apoio nesta jornada, vocês foram fundamentais para que eu alcançasse este sonho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Adão e Alexandra, por todo apoio, incentivo, auxílio, suporte e incentivo, vocês foram fundamentais para a conclusão desta graduação. Agradeço também meu irmão Leonardo pelo apoio em diversas ocasiões ao longo desta caminhada. Ainda agradeço a minha esposa Raquel, pela cumplicidade, apoio, ajuda e paciência em todos os momentos desde o princípio da graduação até a conclusão deste trabalho.

A minha orientadora Débora Pedroso Righi, por ter aceitado me orientar, por todos os ensinamentos, confiança e apoio durante toda a realização do trabalho, você é uma pessoa excepcional, muito obrigado!!

A equipe da Aviserra Soluções Ambientais pela oportunidade de emprego na área da engenharia e por aceitarem a minha ausência em diversas oportunidade ao longo da realização deste trabalho.

A equipe do LATEC (Laboratório de Tecnologia da Construção) da UNIVATES, por toda a ajuda durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Atualmente a preocupação com o aumento da vida útil de estruturas de concreto armado tem sido foco de muitos estudos. A falta de manutenção vem ocasionando uma diminuição nesta vida útil e, com isso, o surgimento de diversas manifestações patológicas. Dentre todas as mais conhecidas em estruturas de concreto armado, a corrosão das armaduras apresenta maior potencial de causar danos. Diante disto, este trabalho estudou a durabilidade de três tipos de vigas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada (Método CAIM), no qual induziu-se a corrosão pelo período de 30 dias. Para isso, foram moldadas seis vigas, sendo duas referência, duas com adição de 0,50% de fibras de poli tereftalato de etila (PET) e duas com adição de 1,0% de fibras de PET. As adições foram realizadas sobre o volume total do traço de concreto. Uma viga de cada traço foi utilizada para a realização do ensaio de corrosão. A resistência das vigas foram analisadas por meio de ensaios de tração na flexão, análise de perda de massa e análise de fissuração em todas as vigas que passaram e não passaram pelo processo de corrosão acelerada. A viga referência submetida ao processo de corrosão apresentou uma redução na carga de 1,96% se comparada a viga referência mantida em condições ambiente, enquanto a viga com adição de 0,50% de fibras de PET que passou pelo processo de corrosão quando comparada com a viga referência mantida em condições normais apresentou uma queda de resistência na carga de 7,92% e a viga com adição de 1,0% de fibras de PET apresentou uma queda de 13,06% de resistência quando comparada a mesma viga referência mantida em condições ambientes, porém, apesar de apresentarem resistências inferiores, as adições de fibra conferiram às vigas de concreto armado uma flecha superior, garantindo um maior tempo de resistência ao rompimento, o que representa um resultado satisfatório.

Palavras-chave: Corrosão. Concreto. Fibras de Politereftalato de etila. CAIM.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental	25
Quadro 2 - Classe de agressividade ambiental em relação a exposição	26
Quadro 3 - Causas, estrutura, sintomas da deterioração das estruturas de concreto	31
Quadro 4 - Nomenclaturas usuais do PET	41
Quadro 5 - Processo de reciclagem do PET	45
Quadro 6 - Resultados dos ensaios do agregado miúdo	58
Quadro 7 - Resultados dos ensaios do agregado graúdo	62
Quadro 8 - Nomenclatura adotada das vigas	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	27
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm	27
Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo	57
Tabela 4 - Granulometria do agregado graúdo	60
Tabela 5 - Quantitativo de materiais por traço	70
Tabela 6 - Resistência a tração na flexão	88
Tabela 7 - Espessura das armaduras	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de corrosão de estruturas de concreto armado	33
Figura 2 - Célula de corrosão em concreto armado	35
Figura 3 - Ensaio CAIM	39
Figura 4 - Estrutura molecular do PET	40
Figura 5 - Evolução do resíduo sólido	42
Figura 6 - Fardos de garrafa PET	46
Figura 7 - Moinho triturador de garrafa PET	47
Figura 8 - Processo de reciclagem	47
Figura 9 - Flocos de garrafa PET	48
Figura 10 - Método de produção da fibra de garrafa PET	49
Figura 11 - Fibra de PET	50
Figura 12 - Ensaio de ruptura da fibra de PET	51
Figura 13 - Fluxograma do programa experimental	55
Figura 13 - Dimensões da fibra PET	63
Figura 14 - Fôrmas em MDF	63
Figura 15 - Detalhamento da armadura	64

Figura 16 - Estribos finalizados	65
Figura 17 - Montagem da armadura	65
Figura 18 - Posicionamento dos fios de cobre nas armaduras positivas	66
Figura 19 - Armaduras finalizadas	67
Figura 20 - Espaçadores plásticos nas formas e armaduras	67
Figura 21 - Curva de Abrams para cimento	68
Figura 22 - Slump test	71
Figura 23 - Elementos de concreto moldados	73
Figura 24 - Vigas no processo de cura úmida	74
Figura 25 - CP's cilíndricos e prismáticos no processo de cura úmida	74
Figura 26 - Ensaio de compressão	75
Figura 27 - Ensaio de flexão em 4 pontos	76
Figura 28 - Ensaio de tração na flexão	77
Figura 29 - Estrutura do sistema de ligação	78
Figura 30 - Andamento do ensaio de corrosão acelerada	79
Figura 31 - Fissuração viga RSC	92
Figura 32 - Fissuração viga RCC	93
Figura 33 - Fissuração viga A0,5SC	93
Figura 34 - Fissuração viga A0,5CC	94
Figura 35 - Fissuração viga A1,0SC	94

Figura 36 - Fissuração viga A1,0CC	95
Figura 37 - Mapeamento da fissuração vigas RSC e RCC	96
Figura 38 - Mapeamento da fissuração vigas A0,5SC e A0,5CC	97
Figura 39 - Mapeamento da fissuração vigas A1,0SC e A1,0CC	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Aumento da reciclagem do PET no Brasil	44
Gráfico 2 - Aumento do índice de reciclagem do PET no Brasil	45
Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado miúdo	57
Gráfico 4 - Curva granulométrica do agregado graúdo	61
Gráfico 5 - Resistência à compressão simples do concreto	83
Gráfico 6 - Resistência à tração na flexão - corpos de prova prismáticos	84
Gráfico 7 - Resistência à tração na flexão - vigas sem corrosão	86
Gráfico 8 - Resistência à tração na flexão - vigas com corrosão	87
Gráfico 9 - Resistência à tração na flexão - vigas referência	89
Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão - vigas com adição de 0,50% de PET 90	
Gráfico 11 - Resistência à tração na flexão - vigas com adição de 1,00% de PET	91

LISTA DE ABREVIATURAS

PET	Poli Tereftalato de Etila
CAIM	Corrosão Acelerada por Imersão Modificada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
R	Resistência à Compressão
D	Durabilidade
DES	Fator de Desempenho
%	Medida de razão – Porcentagem
CA	Elementos Estruturais de Concreto Armado
CP	Elementos Estruturais de Concreto Protendido
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cl	Cloro – elemento químico
O ₂	Oxigênio – elemento químico
SO ₄ ²⁻	Sulfato – elemento químico
Fe	Ferro – elemento químico
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
d.d.p	Diferença de Potencial

LEME	Laboratório de ensaios e modelos estruturais da UFRGS
NaCl	Cloreto de Sódio – elemento químico
V	Volt – unidade de tensão elétrica
g/l	Unidade de medida em gramas por litro
°C	Unidade de temperatura em grau Celsius
IUPAC	International Union of Pure And Applied Chemistry
IDEC	Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
Kgf	Quilograma-força – medida de força sujeita a gravidade
g/m ³	Unidade de medida em gramas por metro cúbico
LATEC	Laboratório de Tecnologias da Construção – UNIVATES
cm	Unidade de medida em centímetros
NM	Norma Mercosul
g	Unidade de medida em gramas
mm	Unidade de medida em milímetros
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
CP V ARI	Cimento Portland classe cinco de alta resistência inicial
RS	Rio Grande do Sul
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CA	Classe de resistência do aço

MPa	Unidade de medida em Mega Pascal
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
A/C	Relação água/cimento
mA	Unidade de medida em miliampere
Ø	Símbolo correspondente a diâmetro
F	Força máxima registrada no ensaio (N);
L	Dimensão entre apoios (mm);
b	Largura média do corpo de prova (mm);
d	Altura média do corpo de prova (mm);
a	Distância média entre a linha de ruptura da face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).
N	Unidade de medida em Newton
RSC	Viga referência sem corrosão
RCC	Viga referência com corrosão
A0,5SC	Viga com adição de 0,50% de fibras de PET sem corrosão
A0,5CC	Viga com adição de 0,50% de fibras de PET com corrosão
A1,0SC	Viga com adição de 1,00% de fibras de PET sem corrosão
A1,0CC	Viga com adição de 1,00% de fibras de PET com corrosão
%	Símbolo de porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Justificativa da pesquisa	19
1.4 Estrutura do trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Concreto Armado: definições	22
2.2 Durabilidade, desempenho e vida útil das estruturas	23
2.2.1 Desempenho das estruturas	24
2.2.2 Vida útil das estruturas	24
2.2.3 Durabilidade das estruturas	24
2.3 Patologia das construções	28
2.4 Degradação das estruturas de concreto armado	29
2.4.1 Causas químicas	32
2.4.2 Causas eletroquímicas	32
2.4.2.1 Corrosão das armaduras	32
2.4.2.1.1 Corrosão química	34
2.4.2.1.2 Corrosão aquosa ou corrosão eletroquímica	34
2.4.2.2 Corrosão induzida por cloretos	36
2.5 Método CAIM - Corrosão Acelerada por Imersão Modificada	37
2.6 Poli Tereftalato de Etileno - PET	39
2.6.1 Meio Ambiente e Reciclagem	42

2.7 Concreto com adição de fibra de PET	49
3 MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Programa Experimental	53
3.1.1 Estratégia de pesquisa	54
3.2 Materiais	55
3.2.1 Agregado Miúdo	55
3.2.1.1 Determinação da Granulometria	56
3.2.1.2 Massa Específica e Massa Unitária	57
3.2.2 Cimento	58
3.2.3 Agregado Graúdo	59
3.2.3.1 Determinação da Granulometria	59
3.2.3.2 Massa Específica e Massa Unitária	61
3.2.4 Água de Amassamento	62
3.2.5 Fibra de Polietileno Tereftalato ou PET	62
3.3 Produção das Vigas	63
3.3.1 Formas	63
3.3.2 Armadura	64
3.3.3 Dosagem e Moldagem do Concreto	68
3.3.4 Moldagem dos elementos de concreto	71
3.3.5 Cura do Concreto	73
3.4 Ensaio para Controle do Concreto.	75
3.4.1 Resistência à Compressão Simples	75
3.4.2 Resistência à Tração na Flexão	76
3.5 Corrosão acelerada por imersão modificada - Método CAIM	77
3.6 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	80
3.6.1 Análise da Fissuração	81
3.6.2 Determinação da Perda de Massa	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1 Resistência à compressão simples	82
4.2 Resistência à tração na flexão	84
4.3 Análise da fissuração	92
4.4 Perda de massa	98
5 CONCLUSÃO	100
REFERÊNCIAS	102

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é definida como a deterioração de um metal pela ação química ou eletroquímica do meio com o qual o material está exposto, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos (GENTIL, 1996).

Nas estruturas de concreto armado, a corrosão da armadura deve ser levada em conta desde o início do projeto, tendo em vista que este processo pode comprometer a integridade e estabilidade das estruturas. A corrosão das armaduras se tornou um assunto muito estudado por profissionais da área da engenharia civil, visto que, de todas as patologias relacionadas às estruturas de concreto armado, esta é a que apresenta maiores riscos à segurança. Ainda, é a patologia que aparece com mais frequência (CABRAL, 2000).

As manifestações patológicas representam o campo da medicina que é responsável por analisar e tratar as origens, sintomas e causas das doenças. Assim como no campo da engenharia civil, esta área é responsável por estudar as causas dos problemas nas estruturas, a fim de garantir que a vida útil das mesmas seja mantida pelo tempo estabelecido em projeto. O entendimento dos materiais que compõem as estruturas da construção civil permite que se tenha um melhor dimensionamento e planejamento das edificações, buscando assim, evitar os agentes que a deterioram.

Segundo Silva (2010) os fatores que mais colaboram para o aparecimento da corrosão das armaduras derivam de erros de projetos, cobrimento com espessuras

menores do que o especificado em normas, concretos com especificação inadequada, estruturas inseridas em ambientes agressivos e, ainda, falha na execução do sistema estrutural.

Para Guimarães (2010) a adição de fibras na matriz cimentícia tem apresentado uma melhora significativa agregada ao concreto, pois o incremento transforma o material, que antes era tido como frágil, em um material que apresenta propriedades de tração na flexão e resistência à abrasão.

Meneses (2011), em seus estudos, salienta que a fibra de PET apresenta um grande potencial no reforço da matriz cimentícia, tendo em vista que se trata de um material de baixo custo e totalmente reciclável. Pelisser (2002) realizou a adição de fibras de PET sobre o volume total de concreto e obteve resultados positivos quanto ao ganho de resistência à tração, aumento de tenacidade, resistência ao impacto e fissuração.

Já Betioli (2003) expõe que a utilização das fibras de PET na matriz cimentícia tem o objetivo de promover o aumento da resistência quando submetida a esforços mecânicos, mas deve-se analisar a interação entre a fibra de PET e o concreto ao passar dos anos.

1.2 Objetivos

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

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral analisar as características mecânicas de vigas de concreto armado com adição de fibras de garrafa PET, submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada (MÉTODO CAIM).

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos tratam do conjunto de etapas que devem ser realizadas a fim de atingir o objetivo geral do trabalho, sendo assim, as etapas definem-se em:

- a. analisar os efeitos da adição das fibras de garrafa PET (0,5% e 1,0% do volume total) em termos de resistência mecânica dos concretos;
- b. analisar a adição das fibras de garrafa PET em vigas de concreto armado quando submetidas a corrosão;
- c. comparar a resistência mecânica entre as vigas de concreto armado referência e as vigas com adição de fibras de garrafa PET, quando submetidas à corrosão;
- d. analisar a fissuração e a perda de massa das barras e armaduras positivas nas vigas de concreto armado após a corrosão acelerada.

1.3 Justificativa da pesquisa

Com o passar dos anos a preocupação com o meio ambiente tem se intensificado, aliado a isso, a diminuição dos materiais utilizados na construção civil oriundos da natureza, bem como o seu aumento de preço, acabou contribuindo para que pesquisas sejam feitas, a fim de descobrir potenciais materiais que possam ser substituídos ou adicionados a matriz cimentícia, materiais estes que devem apresentar aumento das características do concreto, baixo custo e preferencialmente colaborem para a preservação da natureza.

Coró (2012) aponta que, nessa busca por novos materiais, as fibras vêm ganhando um ponto de destaque como um material de reforço no concreto. A adição de fibras em materiais cimentícios e cerâmicos têm apresentado melhorias significativas se tratando das propriedades mecânicas do material, principalmente no que tange o controle de fissuração, aumento da capacidade de carga pós-ruptura e o aumento da durabilidade e tenacidade do material cimentado.

As fibras de PET se tornam viáveis como um reforço da matriz do concreto, pois trata-se de um material 100% reciclável, que apresenta baixo custo e hoje é o segundo material mais encontrado em aterros sanitários. O PET é utilizado para a fabricação de garrafas e embalagens para líquidos, o que o torna um material comumente encontrado em lixos urbanos, que pode trazer altos danos a natureza se não lhe for dada uma destinação correta. Então, a utilização das fibras provenientes deste material na construção civil, acaba se tornando uma excelente solução para os resíduos das cidades (CORÓ, 2012).

Justifica-se o objeto de pesquisa principal deste trabalho devido a poucas referências bibliográficas que correlacionam concretos armados com o uso da fibra de garrafa de PET quando submetidos ao processo de corrosão. Ademais, este trabalho busca pela incorporação de novos materiais que possam auxiliar na minimização da degradação de peças estruturais de concreto armado quando expostas a regiões de alta agressividade, aliada a ideia de diminuir o depósito do material estudado em lixões a céu aberto.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se subdividido em 6 capítulos, sendo o capítulo 1 destinado à introdução do assunto abordados, os objetivos a serem alcançados e a justificativa da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, onde são expostos os conceitos de durabilidade, desempenho, vida útil, patologias e degradação das estruturas de concreto armado. Ainda, são mencionados os conceitos referentes ao PET, como definições sobre o assunto, reciclagem e características do concreto com adição de fibras de PET.

No capítulo 3 são apresentadas às metodologia e os materiais utilizados para a realização da pesquisa. No capítulo 4 é abordado o cronograma das atividades que serão desenvolvidas na segunda etapa do trabalho.

Já no capítulo 5 são apresentados os resultados esperados do trabalho. No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa são fornecidas definições quanto à durabilidade, degradação e vida útil das estruturas, quais são as suas causas, como elas agem e quais os impactos causados pelas patologias no concreto armado. Ainda, serão comentados aspectos relevantes sobre a durabilidade, reciclagem e incorporação das garrafas PET no concreto armado.

2.1 Concreto Armado: definições

O concreto é de fundamental importância para a indústria da construção civil. Isso se deve ao fato de o material apresentar um bom comportamento mecânico e boa durabilidade. Entretanto, apesar de expor excelente resistência à compressão, não se comporta bem quando submetido a esforços de tração. Para compensar este ponto fraco do material, são acrescentadas barras de aço, que exercem a função de absorver os esforços de tração, flexão e torção das peças de concreto.

O concreto armado é um material que se deteriora com o passar do tempo, fazendo com que suas características de resistências primárias diminuam, muitas vezes chegando ao ponto de não atender mais aos esforços para qual foram projetados.

Cabrera (2014) destaca que, com o rápido crescimento da construção civil, foi preciso buscar novas formas de construir, surgindo avanços tecnológicos. Estas

tecnologias acabaram por influenciar a forma como as obras são tratadas. A utilização de *softwares* permitiu que se projete de uma forma mais próxima dos limites, reduzindo a seção das peças de concreto armado.

Porém, esta redução acabou por deixar as obras mais suscetíveis às ações do tempo, diminuindo sua vida útil e apresentando processos de deterioração que não se via com tanta frequência anteriormente. Pensando nisso, intensificaram-se os estudos na área com a intenção de desvendar as causas do aparecimento precoce de patologias. Para Cabrera (2014), os novos modelos estruturais necessitam de um cuidado redobrado. Tanto na etapa de projeto, quanto na execução, ambas devem passar por um rigoroso controle.

Pensando nisso, as edificações devem ser projetadas para serem mais duráveis, buscando atender às condições mínimas impostas pelas normas vigentes, como a NBR 6118 (ABNT, 2014) e a NBR 15575-2 (ABNT, 2013). Tais estudos dão origem a conceitos como:

- Durabilidade das estruturas;
- Patologia das estruturas;
- Manutenção das estruturas.

2.2 Durabilidade, desempenho e vida útil das estruturas

Possan (2010) salienta que, antigamente, as estruturas eram projetadas levando-se em conta apenas a resistência à compressão (R), pois era tida como única fonte de segurança nas especificações de projeto. Mas, com o avanço dos anos, verificou-se que o concreto armado apresentava limitações e apenas o fator resistência não era suficiente. Então, acrescentou-se o fator durabilidade (D) e, posteriormente, o fator desempenho (DES), porém, ainda faltava acrescentar a variável tempo nos projetos, surgindo o estudo sobre a vida útil das estruturas.

2.2.1 Desempenho das estruturas

Quanto ao conceito de desempenho das estruturas, a NBR 6118 (ABNT, 2014) define como sendo a capacidade da estrutura em manter-se em condições totais de utilização durante sua vida útil, não podendo apresentar danos que comprometam o uso para qual foram projetadas.

O desempenho das edificações está diretamente ligado ao tipo de usuário e o tipo de uso para qual ela foi projetada. Além disso, as condições de exposição do ambiente também afetam diretamente o seu desempenho.

2.2.2 Vida útil das estruturas

Por vida útil, a NBR 6118 (ABNT, 2014) entende que é o período de tempo durante o qual se mantém as características estruturais de concreto sem exigir medidas extras de manutenção e reparo. Isto quer dizer que após este tempo é que a estrutura deve começar a apresentar efetiva deterioração. A norma estabelece a vida útil sendo, no mínimo, 50 anos.

2.2.3 Durabilidade das estruturas

O conceito de durabilidade das estruturas se refere à capacidade que os materiais empregados em uma determinada construção têm de resistir aos efeitos da agressividade do ambiente ao qual está exposto. A tendência é que, com a exposição à agressividade ambiental, os materiais comecem a se deteriorar, até chegarem no ponto em que seus limites máximos projetados sejam atingidos, então, diz-se que a vida útil da edificação foi atingida. Quando este ponto é atingido, a edificação precisa ser submetida a reparos e/ou reforços, para que seu desempenho para o qual foi projetada, seja restabelecido (CABRERA, 2014).

A NBR 17575-2 (ABNT, 2013) define durabilidade das estruturas como sendo um requisito capaz de conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil. O conceito de durabilidade ainda é complementado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), como sendo a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais definidas pelo projetista estrutural no momento da elaboração do projeto.

Conforme Araújo (2010) para a consideração da durabilidade, devem ser levados em conta os mecanismos de deterioração das estruturas que, basicamente, são lixiviação provocada pela água, a expansão devido à ação de águas e solos contaminados e expansões decorrentes entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos. Ainda, existem vários mecanismos de deterioração relacionados às ações mecânicas, movimentação de origem térmica, impactos, ações cíclicas, e também devem ser consideradas as ações relacionadas à agressividade do ambiente.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a agressividade do ambiente pode ser classificada de acordo com a Quadro 1.

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Risco de Deterioração da Estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Moderada	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito Forte	Elevado

Fonte: adaptado pelo autor com base na NBR 6118 (ABNT,2014).

A classe de agressividade ambiental em relação à exposição está descrita na Quadro 2.

Quadro 2 - Classe de agressividade ambiental em relação a exposição

Região da Estrutura	Tipo de Ambiente			
	Ambiente Interno		Ambiente Externo	
	A	B	C	D
Rural	I	I	I	I
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	---	III
Industrial	II	IV	II	III
Industrial(*)	III	V	IV	IV
Respingo de Maré	---	---	---	IV
Submersa	---	---	---	I
Solo	---	---	Ver(**)	Ver(**)

(*) Ambientes quimicamente agressivos

(**) Adotar classe I se o solo for seco e não agressivo

(***) Adotar classe II, III ou IV se o solo for úmido e agressivo

Ambiente A: ambientes internos secos (com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%)

Ambiente B: ambientes internos úmidos ou caracterizados por ciclos de molhagem e secagem.

Ambiente C: ambientes externos secos (com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%).

Ambiente D: ambientes externos úmidos ou caracterizados por ciclos de molhagem e secagem.

Fonte: adaptado pelo autor com base na NBR 6118 (ABNT,2014).

Para evitar a deterioração prematura das estruturas devem ser observados diversos critérios nas fases de projeto, dentre eles, especificação de um concreto de boa qualidade, de cobrimento mínimo das armaduras, verificar quaisquer aberturas de fissuras e o correto detalhamento das armaduras.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) a durabilidade das estruturas está intimamente ligada às características do concreto e da espessura e qualidade do concreto de cobrimento da armadura. A qualidade do concreto está associada à relação água-cimento e à resistência à compressão do concreto, para isso, a norma apresenta a Tabela 1, da qual permite escolher a resistência à compressão do concreto em função da classe de agressividade ambiental.

Tabela 1 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 1)			
		I	II	III	IV
Relação Água/Aglomerante em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\geq 0,45$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: adaptado pelo autor com base na NBR (ABNT,2014).

Em relação ao cobrimento, a NBR 6118 (ABNT, 2014) especifica que a proteção das armaduras ativas deve ser garantida pela bainha, completada por graute e calda de cimento Portland, não podendo conter adições ou graxas. A norma expõe que, para garantir o cobrimento mínimo, o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal, que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução. Portanto as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais, apresentados na Tabela 2, para $\Delta c = 10$ mm.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (TABELA 1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte: adaptado pelo autor com base na NBR (ABNT,2014).

Para Cabrera (2014) a durabilidade das estruturas está diretamente ligada a alguns fatores, entre os quais se destaca a água que será utilizada na produção do

concreto. A relação água/cimento afeta diretamente a durabilidade das estruturas, pois a partir desta relação dependem:

a resistência mecânica do concreto;

- porosidade;
- densidade;
- permeabilidade;
- fissuração por retração;
- capilaridade.

Quanto maior a relação água/cimento do concreto menor será a sua resistência mecânica. Ainda, quanto maior a quantidade de água presente no concreto, maior será o aparecimento de poros. Isto acontece pois toda a água que não é usada no processo de hidratação do concreto acaba evaporando, causando assim os vazios.

A agressividade do meio ambiente também é um fator determinante para a durabilidade das estruturas, pois há lugares com grande incidência de agentes químicos e cloretos, sendo que ambos acabam por provocar a corrosão da armadura, para os agentes químicos o processo se dá pelo processo de despassivação da armadura. Já os cloretos percolam pelos poros do concreto provocando a corrosão das armaduras. Com a tentativa de minimizar tais efeitos existem cobrimentos mínimos para cada ambiente, como visto anteriormente na Tabela 2.

2.3 Patologia das construções

A patologia na construção civil é quando uma edificação apresenta defeitos que afetem as funções para qual a edificação foi projetada. A gravidade das manifestações patológicas varia de acordo com as causas e origens do problema, podendo ocorrer desde patologias brandas, como fissuras passivas e manchas, até as mais severas como a corrosão das armaduras e deterioração do concreto.

O ramo da patologia das construções, dentro da Engenharia, se caracteriza por ser o estudo dos sintomas, causas, origens e as consequências das patologias, buscando aperfeiçoar mecanismos para que ocorra a diminuição das manifestações.

Para Helene (1993) a sintomatologia tem como objetivo analisar as edificações, buscando encontrar indícios de manifestações patológicas. Após a confirmação da patologia, busca-se entender como ocorreu o processo de deterioração, chegando, enfim, ao diagnóstico da estrutura. O autor, ainda salienta que, nesta etapa, são investigadas as causas e as origens do problema, para que se possa determinar com precisão a gravidade da patologia, pois, cada caso deve ser tratado de forma individual. Uma fissura ativa por exemplo, deve receber um tratamento com material flexível, para que o material possa acompanhar a movimentação da fissura, enquanto uma fissura passiva, após resolvido o excesso de carga que ocasionou o problema, pode ser resolvida com um material rígido.

Após o término da avaliação das manifestações patológicas, o passo seguinte é dar o prognóstico. Nesta etapa busca-se determinar a evolução do problema e suas consequências. Para isso são tomadas decisões que levam em consideração o material e a técnica que serão usadas para realizar o reparo. É importante levar em consideração se o reparo será viável economicamente, pois muitas vezes os métodos e materiais necessários para realizar a terapia da manifestação patológica acabam por tornar a manutenção inviável economicamente, restando então, apenas a opção pela demolição da edificação (HELENE, 1993).

2.4 Degradação das estruturas de concreto armado

A degradação das estruturas é oriunda da penetração de líquidos, gases e/ou vapores, que ocorrem através das fissuras ou poros presentes no concreto. Nepomuceno (2005) aponta que fatores como a umidade, a orientação e velocidade dos ventos, as variações de temperatura, a presença de substâncias agressivas no meio, a periodicidade das chuvas, os materiais utilizados na fabricação do concreto

e a porosidade do mesmo, compõem uma importante interação entre o meio ambiente e o concreto.

O processo de deterioração de estruturas de concreto armado dificilmente ocorre por uma causa isolada. O material pode apresentar boa qualidade, mas, um único fator adverso no qual a estrutura seja submetida, pode desencadear um processo de deterioração. Santos (2012) defende a ideia de que a vulnerabilidade da estrutura a agente externos está diretamente ligada a permeabilidade do concreto. Isso quer dizer que, quanto mais permeável o concreto for, maior será sua vulnerabilidade. Neville (1997) destaca que a impermeabilidade do concreto acaba por se tornar a primeira defesa contra os ataques dos agentes externos, sejam eles químicos ou físicos.

Para Santos (2012), às manifestações mais recorrentes de deterioração de estruturas se dão quando um ou mais agentes interagem com a estrutura de concreto e aço, reduzindo o seu desempenho gradativamente. Pensando nisso, o estudo e compreensão das causas destes processos são de fundamental importância. O autor ainda destaca que as principais patologias causadoras da degradação das estruturas são as de natureza:

- física;
- eletroquímica;
- mecânica;
- química.

No Quadro 3, são apresentadas as causas, estrutura, os sintomas e os principais pontos das edificações afetadas.

Quadro 3 – Causas, estrutura, sintomas da deterioração das estruturas de concreto

Causas	Estrutura	Sintomas	Ponto de degradação
Mecânica	Choque e impactos	Fissuração e lascamento do concreto; possível perda da armadura.	Concreto e armadura
	Recalque diferencial das fundações		
	Agentes imprevisíveis		
Física	Desgaste superficial	Desgaste superficial do concreto	Concreto
	Cristalização dos sais nos poros de concreto	Fissuração e esmagamento do concreto	Concreto
	Retração Hidráulica concreto em estado fresco	Fissuração do concreto	Concreto
	Gradiente térmico	Fissuração do concreto	Concreto
	Ação do fogo	Fissuração: desidratação da pasta de cimento; ruptura e colapso da armadura	Concreto e armadura
Química	Reação Álcali-Agregado	Expansão e fissuração do concreto	Concreto
	Hidratação dos óxidos do cimento		
	Ataque por sulfatos	Decomposição química da pasta; despassivação da pasta; expansão. Fissuração; perda de resistência	Concreto
	Ataque por ácidos	Decomposição química da pasta e lixiviação da pasta de cimento; eflorescências.	Concreto
	Água pura	Decomposição química; dissolução e lixiviação da pasta de cimento, eflorescências	Concreto
	Carbonatação	Redução progressiva do pH do concreto e despassivação do aço	Concreto e aço
	Ataque por cloretos	Despassivação do aço e posterior corrosão das armaduras	Concreto e aço
Eletroquímica	Corrosão das armaduras	Deterioração e perda de seção do aço; perda de aderência aço-concreto; expansão; fissuração e lascamento do concreto	Começa no concreto e depois ataca o aço

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Berton (2019) e Santos (2010).

2.4.1 Causas químicas

Berton (2019) aponta que as causas químicas se manifestam nas estruturas em virtude dos efeitos de grande permeabilidade e porosidade do concreto, além do decréscimo de resistência, pelo aparecimento de fissuras, destacamentos e pela decomposição química das estruturas.

Já para Poggiali (2009) as causas químicas estão ligadas a causas externas, como a ação de agentes externos presentes no meio onde se encontra a estrutura, e ainda, por causas internas, como reações álcali-agregado e reações do concreto.

2.4.2 Causas eletroquímicas

As causas eletroquímicas são as que provocam a corrosão das armaduras. Esta corrosão inicia nas armaduras inseridas no interior do concreto e posteriormente acabam por atacar o concreto.

A corrosão do aço existente em estruturas de concreto tem como causa fatores eletroquímicos, fatores estes que são diretamente influenciados pela umidade do meio. Para valores de umidade relativamente baixos, o aço não sofre corrosão, todavia, quando a taxa de umidade ultrapassa os 60%, o processo de corrosão das armaduras torna-se acelerado (HELENE, 1986). Já para Gentil (2003) a aceleração do processo de corrosão por umidade, só se torna acelerado quando as taxas ultrapassam os 70%.

2.4.2.1 Corrosão das armaduras

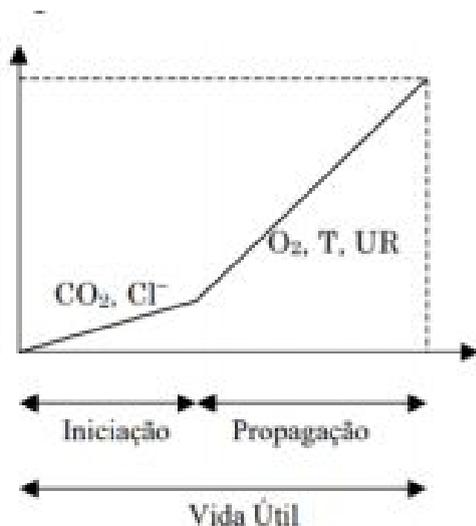
A corrosão pode ser definida como um processo que resulta da interação entre o material e o meio onde ele está inserido, resultando em reações químicas e eletroquímicas, podendo estar ligadas ou não a ações mecânicas e físicas, que

resultam na destruição do material. A ocorrência desta manifestação patológica em armaduras no concreto é resultante de fissuras, deslocamento da camada de cobrimento das armaduras, manchas superficiais e pela própria perda de seção das armaduras (SOARES et al. 2015).

Gentil (2003) expõe que a corrosão nos materiais pode ser ocasionada por processos eletroquímicos ou químicos, podendo estar ligada a esforços mecânicos ou não isto depende diretamente do meio em que o material está exposto, ainda, as manifestações podem ocorrer na forma de oxidação ou na corrosão propriamente dita.

Na Figura 1 Tutti (1982) explana que o processo corrosivo pode ser dividido em duas etapas, uma de iniciação e outra de propagação. Para a etapa de iniciação o autor delimita o tempo necessário para que os agentes agressivos sejam capazes de atingir a armadura. Já a segunda etapa é definida como a corrosão propriamente dita da armadura.

Figura 1 - Mecanismo de corrosão de estruturas de concreto armado.



Fonte: Tutti (1982)

Para Cabral (2000) a corrosão das armaduras encontradas nas estruturas de concreto armado tem três consequências importantes:

- a corrosão pode afetar diretamente a armadura, ocasionando perda de seção transversal e redução da resistência mecânica;
- a corrosão pode provocar a formação de hidróxidos e óxidos. Este processo gera uma expansão do concreto, devido a incorporação de moléculas de água, o que aumenta a tensão do material, podendo gerar fissuras;
- por fim, a corrosão interfere diretamente no desempenho aço-concreto, diminuindo sua durabilidade

2.4.2.1.1 Corrosão química

Casudo (1997) define o processo de oxidação, popularmente conhecido como corrosão química, como sendo uma reação entre o gás e o metal, gerando uma película de óxidos. A oxidação é um processo lento que não contribui para a deterioração superficial das barras metálicas.

Helene apud Polito (2008) expõe que este processo acontece em ambiente industrial, na fabricação das barras de aço, e se trata de uma camada superficial uniforme, pouco permeável que eventualmente acaba assumindo o papel de proteção do aço.

2.4.2.1.2 Corrosão aquosa ou corrosão eletroquímica

A corrosão aquosa, também conhecida como corrosão eletroquímica, é a corrosão propriamente dita. Este processo é o que ocasiona problemas para as obras de construção civil (CASUDO, 1997).

Para Helene (1986), a corrosão eletroquímica tende a produzir óxidos de ferro, que dependem da existência de um eletrólito, de diferença de potencial, da existência de oxigênio e da existência de agentes agressivos para se manifestarem.

A corrosão eletroquímica causa a formação de pilhas eletroquímicas, que podem ocorrer em lugares distintos dentro de uma mesma solução. Isto é o que

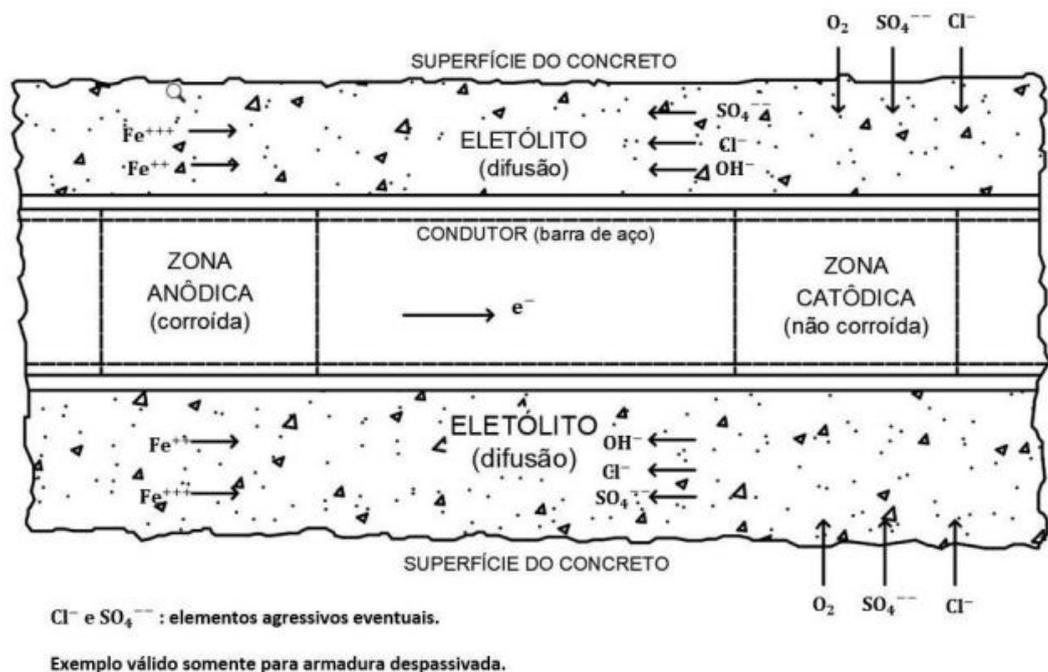
acontece nas armaduras presentes no concreto armado (COMIM e ESTACECHEN apud CASUDO, 2007).

Gentili (2003) define pilha eletroquímica como sendo a junção dos seguintes componentes:

- ânodo: é a porta de entrada da corrente elétrica no eletrólito, por meio de íons positivos. É o eletrodo onde ocorre a oxidação;
- cátodo: é o eletrodo responsável por produzir a corrente elétrica e as cargas negativas que provocam as reações de redução;
- condutor: material líquido que contém íons, sendo o responsável por transportar a corrente do ânodo até o cátodo;
- círculo metálico: local onde ocorre a ligação entre o ânodo e o cátodo, sendo por onde transcorrem os elétrons, no sentido ânodo-cátodo.

Na Figura 2 é apresentado o esquema de corrosão em uma célula de concreto armado.

Figura 2 - Célula de corrosão em concreto armado



Fonte: Helene (1986)

Segundo o que foi exposto por Helene (1986), medidas que impossibilitem o aparecimento da corrosão nas barras de aço presentes no concreto armado devem estar previstas na etapa de projeto, tendo em vista que, no interior das peças de concreto, os requisitos mínimos para a aparição do processo de corrosão sempre estão presentes. O autor ainda enfatiza que em concretos saturados não ocorre o processo de corrosão, pois o mesmo não apresenta oxigênio e eletrólitos.

Helene (1986) salienta que substâncias como cloretos, sulfetos, dióxido de carbono e nitritos, tendem a acelerar o processo de corrosão das armaduras, pois, quando ocorre o contato destas substâncias com o concreto, elas provocam a perda da camada de proteção das barras de aço, ocasionando a corrosão das mesmas.

2.4.2.2 Corrosão induzida por cloretos

Mota *et al.* (2012), apontam que a corrosão das armaduras presentes nas estruturas de concreto armado é considerada uma das principais causas de degradação das edificações. Isso se dá devido à ação de cloretos, que são substâncias altamente agressivas para o concreto, mesmo os que possuem pH elevado. Há duas formas dos cloretos se manifestarem no concreto. A primeira é pelo uso de materiais contaminados (agregados, água e aditivos), e a segunda pela penetração nos poros do concreto, sendo que ambos acabam causando a despassivação da armadura.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a despassivação como um mecanismo preponderante de deterioração relativa à armadura e ocorre devido ao elevado teor de íon cloro (cloreto). Berton (2019) aponta que as características específicas das obras, como o concreto utilizado, a espessura do cobrimento da armadura e o controle da fissuração e porosidade do concreto, permitem que se tenha um maior controle da entrada de agentes internos no interior do concreto.

Cabrera (2014) aponta os cloretos como sendo o principal agente agressivo capaz de causar a corrosão de armaduras. Os cloretos agem rapidamente atacando

regiões pontuais, levando a perda de seção transversal das armaduras, o que pode levar as estruturas à ruína, caso a corrosão não seja solucionada e a peça recuperada. Santos (2006) expõe que o transporte dos cloretos absorvidos pelos poros do concreto, ocorrem internamente de quatro diferentes formas, sendo elas:

- migração iônica: se caracteriza pela migração dos íons de cloreto pelo campo gerado no processo eletroquímico;
- difusão: se caracteriza pela diferença de concentração de cloretos nos diferentes ambientes do concreto e é o principal mecanismo de transporte de cloretos em concretos saturados;
- permeabilidade: é definida pela absorção de fluidos relacionado a pressão e tem relação direta com o diâmetro dos poros, ou seja, quanto maior os poros do concreto, maior será a absorção;
- adsorção: é definido como a retenção de líquidos ricos em íons cloretos e é o primeiro passo de contaminação das estruturas de concreto armado.

Cabrera (2014) apresenta uma definição quanto ao tamanho dos poros presentes na estrutura de concreto, e as classifica conforme sua ordem de grandeza:

- de ar aprisionado: resultante do adensamento do concreto;
- de ar incorporado: resultante de aditivos incorporadores de ar;
- capilares: obtidos na saída da água livre no concreto;
- de gel: gerados a partir da água de gel.

2.5 Método CAIM - Corrosão Acelerada por Imersão Modificada

O ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada, ou Método CAIM, foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, e é umas das metodologias mais utilizadas para acelerar o processo de corrosão em elementos de concreto. O ensaio consiste na imersão de corpos de prova de concreto armado em solução aquosa com adição de cloretos, aliado a uma

corrente elétrica, que tem a função de facilitar a migração dos íons cloretos para a armadura (GRAEFF, 2007).

Os ensaios de corrosão acelerada são muito utilizados para verificar como a corrosão das armaduras interfere nas propriedades do aço presente nas estruturas de concreto. Para que o processo de corrosão acelerada ocorra é necessária a combinação de uma solução agressiva de cloretos e uma d.d.p - diferença de potencial, a fim de criar uma indução eletroquímica. É importante salientar que a corrente aplicada deve ser constante, pois o aquecimento dos corpos de prova e a distorção mecânica do ensaio devem ser evitadas, possibilitando, assim, um maior controle sobre a taxa de corrosão (BERTON, 2019).

Torres (2006) destaca que o ensaio eletroquímico tem como objetivo analisar a perda de massa das barras e determinar as consequências da corrosão causada no aço. O método permite analisar o grau de corrosão e definir a porcentagem de aço deteriorada no processo. O autor ainda expõe que o ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada é considerado um ensaio visual e de resultado rápido para análise da corrosão de armaduras. Todavia, é um ensaio que exige elevada dedicação, pois, como as mudanças acontecem rápido, o acompanhamento deve ser frequente. Ainda, é necessário garantir o correto posicionamento das barras de aço e a cura do concreto.

O ensaio foi desenvolvido pelo LEME - Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS. Inicialmente, colocava-se o corpo de prova submerso em um pequeno aquário de vidro com solução de 0,6 Molar de cloreto de sódio (NaCl), ligando o corpo de prova em uma placa metálica ligada a uma fonte de alimentação. O polo oposto era fixado na armadura do corpo de prova, e então era aplicada uma diferença de potencial de 60 V. O ensaio tinha duração de 07 horas, sendo acompanhada a degradação dos corpos de prova. Após o término do ensaio, os corpos de prova eram rompidos, suas barras retiradas e então se realizava a avaliação da perda de massa de cada barra (TORRES, 2006).

Cabrera (2014) salienta que hoje o ensaio é realizado de forma diferente. Os corpos de prova são colocados em uma espécie de “forma” com uma solução aquosa de cloretos de 35,0 g/L, onde as vigas de concreto armado são ligadas em série à uma fonte de alimentação com corrente constante. O tempo de ensaio varia de acordo com o grau de corrosão esperado.

A Figura 3 representa o ensaio sendo executado, onde é possível observar os corpos de prova imersos na solução de cloreto e a fonte de alimentação usada para gerar a corrente elétrica contínua.

Figura 3 - Ensaio CAIM



Fonte: Stein (2016)

2.6 Poli Tereftalato de Etileno - PET

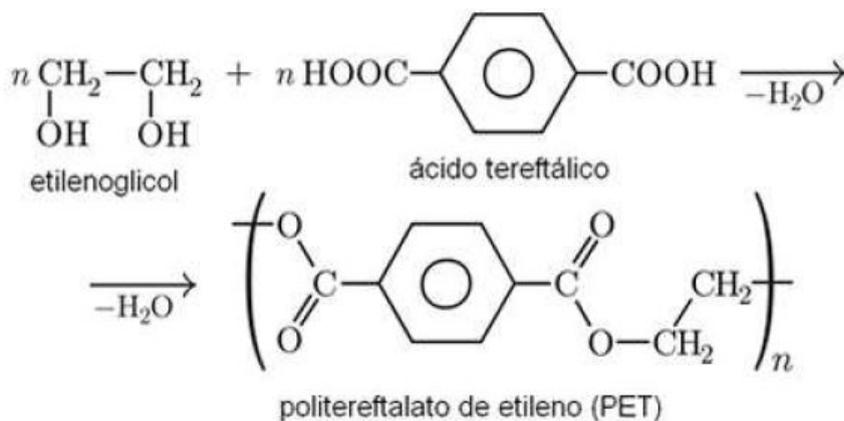
Segundo Romão *et al.* (2009) o PET é definido como um polímero termoplástico oriundo da família do poliéster, e é considerado um dos plásticos mais versáteis dentro do campo da engenharia. O químico Wallace H. Carothers foi o responsável por fazer a síntese do primeiro poliéster no ano de 1930. A criação se deu a partir de monômeros à base de trietileno glicol e ácido dicarboxílico hexadecametileno. No entanto, foi no ano de 1941 que os químicos John Rex Whinfield e James Tennant Dickson criaram o Tereftalato de Etileno ou PET, que se trata de um poliéster que possui alta temperatura de ponto de fusão e excelente estabilidade hidrolítica.

Melo (2004) aponta que a estrutura molecular do PET é o resultado da reação entre dois monômeros:

- I. etileno glicol ou glicol etilênico, que se trata de um álcool, líquido a temperatura ambiente, e que possui ponto de ebulição de 197°C;
- II. ácido tereftálico ou tereftalato de metila, que é um monômero sólido, que possui ponto de fusão de 147°C.

Na Figura 4 é possível observar a estrutura molecular do PET.

Figura 4 - Estrutura molecular do PET



Fonte: Romão et al (2009).

Melo (2004) aponta que o PET pode ser apresentado de duas formas, como homopolímero que se trata da repetição de apenas um mero, esta configuração é pouco utilizada, pois se cristaliza facilmente, e pode ser apresentado como copolímero, que se trata da repetição de dois meros.

A IUPAC - *International Union of Pure And Applied Chemistry* (2015), expõe que o PET pode ser apresentado de várias formas, conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Nomenclaturas usuais do PET

Nomenclatura	Definição
PET OU PETE	Pela IUPAC. Poly (ethylene terephthalate) que, traduzido para o Português, torna-se Poli (tereftalato de etileno)
PETP	Pelos grupos industriais, utilizados na produção de garrafas bi-orientadas molecularmente
PETG	Copoliéster utilizado na extrusão-sopro de garrafas não bi-orientadas molecularmente
Nomenclatura	Definição
OPET	PET orientado, estirado antes do sopro da garrafa, com finalidade de aumentar resistência mecânica e propriedade de barreira à gases
APET	PET amorfo, sem orientação de baixa cristalinidade, pouco resistente, alto brilho e transparência, utilizada em produtos termoformados como bandejas para alimentos
CPET	PET cristalino contém aditivos como iniciadores e nucleadores, alto grau de cristalinidade, opaco, utilizados em produtos que podem ser levados ao freezer e forno simultaneamente sem sofrer alterações

Fonte: IUPAC (2015).

O PET pode ser dividido levando-se em conta as suas variadas formas e etapas de criação e transformação, sendo as mais usuais o PET Polímero, PET Resina, PET Pré-Forma e o PET Garrafa (ROMÃO et al., 2009).

Para Tonet (2009) o PET se tornou o recipiente ideal para o transporte e armazenamento de líquidos pois apresenta certas características químicas e físicas, sendo elas:

- Boa resistência mecânica e química;
- Impede o contato com gases e odores;
- Baixa massa específica comparada às embalagens tradicionais de vidro;
- Baixo custo de armazenamento, transporte e produção.

O PET é um material que tem ganhado muito espaço no mercado de embalagens nos últimos anos, devido às suas características. Com isso o seu descarte aumentou com a mesma proporção. Grande parte é utilizada em

reciclagem, mas ainda um grande parcela do material é descartada de forma inadequada.

2.6.1 Meio Ambiente e Reciclagem

Com o crescimento da população e o aumento do seu poder aquisitivo ao longo dos anos, houve uma mudança na geração de resíduos produzidos. Hoje os resíduos que são encontrados nos aterros sanitários, são diferentes dos que eram encontrados no passado, tanto em questão de volume, quanto de qualidade. O processo de industrialização (Figura 5), que o mundo passou, trouxe novos materiais que necessitam ser descartados, conseqüentemente aumentando o volume nos aterros sanitários (MENESES, 2011).

Figura 5 - Evolução do resíduo sólido



Fonte: Pereira (2016)

Mano e Mendes (2001) destacam que na década de 1970 a sociedade começa a sentir os impactos da poluição ambiental, consequência do aumento do volume de materiais descartados erroneamente. Um dos materiais é o plástico.

O aumento do consumo de materiais descartáveis está diretamente ligado com o nível socioeconômico da sociedade. Isso quer dizer que, quanto maior o poder aquisitivo da sociedade, maior é o seu consumo de embalagens descartáveis. Esse aumento de consumo tem um impacto direto no aumento da geração de resíduos e de materiais descartáveis em aterros sanitários (FORMIGONI e CAMPOS, 2007).

Segundo Dias e Teodósio (2006), são gerados no Brasil diariamente cerca de 149 mil toneladas de resíduos sólidos, onde apenas 9% são reciclados. O que sobra é destinado para aterros sanitários legalizados (32%) e aterros sanitários clandestinos (59%).

Segundo Leite (2003) no Brasil cerca de 67% do volume total de resíduos sólidos produzidos são de embalagens descartadas incorretamente. Deste volume total, aproximadamente um terço é representado por resíduos plásticos e embalagens.

Leite (2003) destaca que devem ser criados meios que tenham a capacidade de diminuir os resíduos sólidos, principalmente os oriundos do PET. O autor salienta que é necessário a criação de incentivos por parte dos órgãos públicos. Deve ser aplicado um plano de coleta seletiva e reciclagem que tenha a capacidade de diminuir a quantidade de material que hoje é destinada para aterros sanitários e lixões a céu aberto.

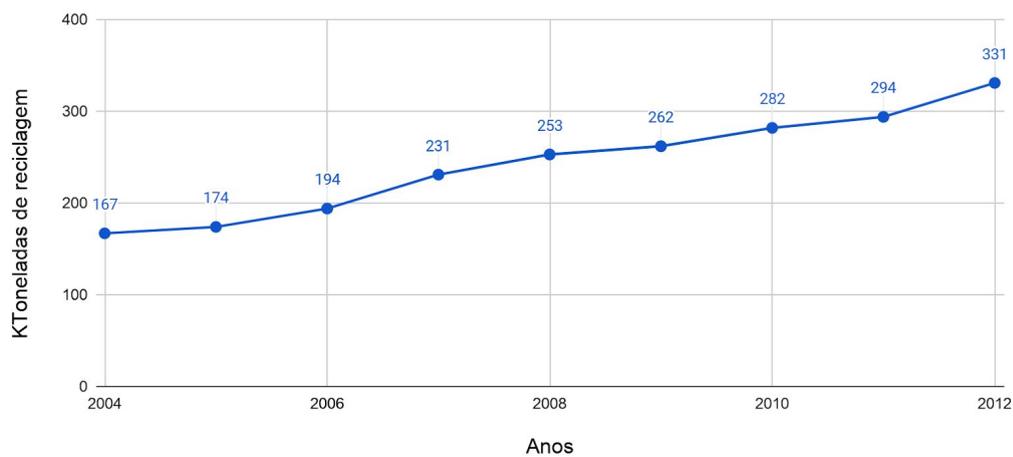
Segundo dados do IDEC (Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor), (2011), menos de 10% dos municípios brasileiros realizam a coleta seletiva de lixo. Os estados que mais se preocupam com esta coleta são os pertencentes a região Sul e Sudeste, que juntos somam 86% da coleta de materiais recicláveis, sendo assim, cerca de 14% da população tem acesso a coleta reciclada, o que resulta em apenas 3% de material sólido reciclado.

A reciclagem é uma alternativa viável para diminuir o quadro atual do resíduo sólido no Brasil. Hoje ainda não há outra alternativa que possibilite a redução da utilização do PET. Sendo assim, a reciclagem se torna a alternativa mais pertinente,

pois além de agir na diminuição do descarte incorreto do material, ainda propicia a criação de novos materiais (NUNES et al.,2005).

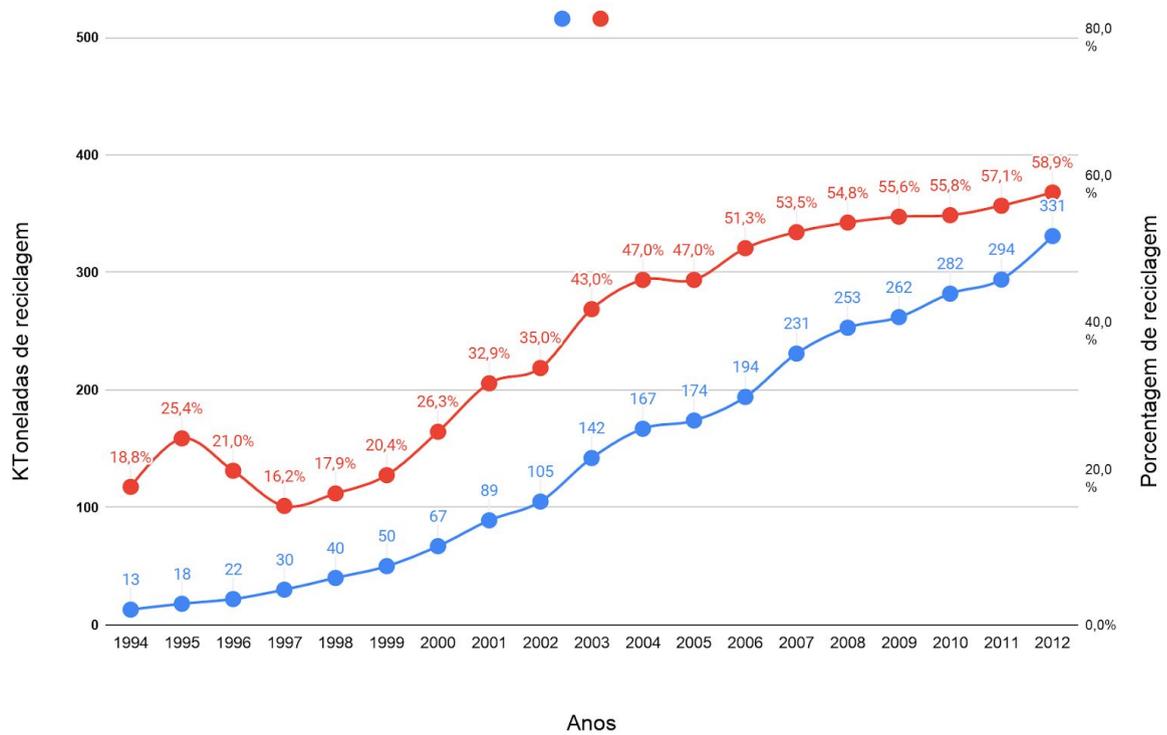
Os Gráficos 1 e 2, de acordo com ABIPET (2013), mostram que segundo o Censo da Reciclagem do PET realizado no ano de 2009, o Brasil reciclou 331 mil toneladas de PET, este montante representa 58,9% de todo o material consumido no país.

Gráfico 1 - Aumento da reciclagem do PET no Brasil



Fonte: Adaptado pelo autor com base em ABIPET (2013).

Gráfico 2 - Aumento do índice de reciclagem do PET no Brasil



Fonte: Adaptado pelo autor com base em ABIPET (2013).

No Quadro 5, são apresentados os três processos possíveis para a reciclagem do PET (MELO, 2004).

Quadro 5 - Processo de reciclagem do PET

Processo	Descrição	Métodos e Resultados
Químico	Separação dos componentes do PET. Fornecimento de matéria prima para solventes e resinas.	Hidrogenação; Gaseificação; Quimólise; Pirólise.
Energético	Queima do PET	Geração de calor; Geração de energia elétrica.
Mecânico	Uso de máquinas e equipamentos para moer e triturar o PET.	Coleta; Separação; Revalorização; Transformação.

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Melo (2004).

Segundo a ABIPET (2013), no Brasil a maior parte da reciclagem do PET é feita através do processo mecânico. Este processo é dividido em três grandes grupos:

1. Recuperação
 - a. Coleta seletiva
 - b. Triagem
 - c. Prensagem
2. Revalorização
 - a. Moagem
 - b. Lavagem
3. Transformação
 - a. Produção de novos produtos

A ABIPET (2016), ainda destaca que a fase denominada como recuperação, se trata da etapa onde as garrafas são separadas através da coleta seletiva. Na triagem é feita a separação das cores das garrafas, dos rótulos e das tampas. Para finalizar a etapa o material previamente separado é submetido a prensagem em fardos, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Fardos de garrafa PET



Fonte: Estadão (2008)

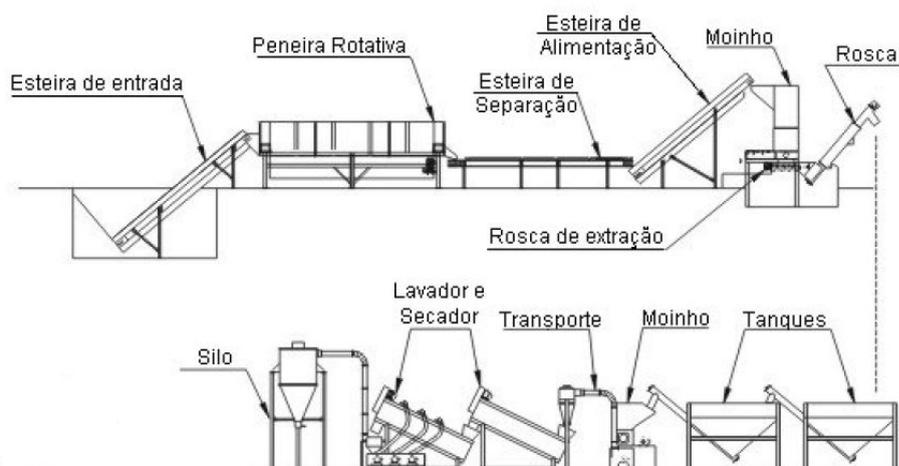
Finalizada a etapa de recuperação, os fardos são submetidos a primeira fase de lavagem. Após o material é submetido ao processo de moagem e trituração das garrafas PET, sendo este processo realizado por um equipamento denominado moinho (Figura 7). Concluída a moagem é feito uma segunda lavagem e a classificação da granulometria, através de uma peneira, sendo armazenado em silos, conforme mostrado na Figura 8, (ABIPET, 2013).

Figura 7 - Moinho triturador de garrafa PET



Fonte: FRAGMAQ (2015).

Figura 8 - Processo de reciclagem



Fonte: ABIPET, 2013.

Segundo a ABIPET (2013), o processo de reciclagem da garrafa PET resulta na matéria-prima denominada floco ou “flakes”, como pode ser observado na (FIGURA 9). Os flocos são utilizados para a fabricação de resina reciclada, e posteriormente vendidos. Cerca de 65% de toda a matéria-prima comprada após o processo de reciclagem é em flakes. Ainda 25% é adquirido em forma de garrafas e 10% em aparas. A finalização do processo de reciclagem mecânica do PET é a transformação, onde o flake se transforma em um novo produto. A maior parte, estimada em 46% é revertida em novas garrafas PETs, 25% é utilizada na indústria de têxtil, sendo usada na produção de fios e tecidos, 11% vai para a indústria automotiva e 18% é destinada para outros fins.

Figura 9 - Flocos de garrafa PET



Fonte: Etruria (2015).

Conforme Rodrigues et al. (2017) o processo de fabricação da fibra de garrafa PET pode ser feito de forma artesanal, onde as garrafas devem ser submetidas a um processo de lavagem e secagem. Para obtenção das fibras é interessante que se use a parte mais maleável da garrafa como pode ser observado na Figura 10.a. Com a área útil da garrafa previamente separada a próxima etapa é realizada com o auxílio de um filetador manual, que pode ser regulado para a obtenção da largura desejada da fibra (FIGURA 10.b). O passo final é realizado com régua e tesoura comum, onde se obtém o comprimento desejado (FIGURA 10.c).

Figura 10 - Método de produção da fibra de garrafa PET



a. Aproveitamento da Garrafa PET



b. Corte da garrafa PET com auxílio do filetador.



c. Fibra de PET medida com auxílio da trena.

Fonte: Rodrigues et al. (2017)

2.7 Concreto com adição de fibra de PET

Segundo Meneses (2011) a busca por alternativas de substituição de agregados e/ou adição de novos materiais que tenham a capacidade de melhorar as propriedades do concreto, além de auxiliar na diminuição do descarte de resíduos sólidos vem aumentando com o passar do tempo. O autor ainda destaca que um dos materiais que estão sendo utilizados são os polímeros, tais como poliéster, epóxi e o PET.

Conforme Pereira (2016) estudos mostram que o PET pode ser utilizado em concretos e argamassas como uma opção para substituir uma parte dos agregados ou ainda ser adicionados em forma de fibras para reforço na retração.

Marangon (2004) expõe que há evidências da utilização de fibras nos materiais de construção há cerca de 5 mil anos. As mesmas eram utilizadas para reforçar postes de argila e se tratavam de fibras vegetais. No entanto o uso de fibras para reforço de concreto é muito recente, e se deu com o surgimento de novos produtos, como fibras poliméricas, metálicas, vegetais e minerais, sendo adicionada aleatoriamente na década de 1960. Os estudos de concretos reforçados com fibras

tiveram início apenas no ano de 1971 nos Estados Unidos. No Brasil o uso das fibras é ainda mais recente, com início na década de 1990.

Para Modler et al (2002) o maior potencial dos materiais fibrosos se concentra no estado de pós-fissuração, pois, as fibras auxiliam de forma mais efetiva na resistência do material, pois possuem módulo de elasticidade menor do que o módulo da matriz cimentícia.

As fibras de PET, Figura 11, tem se tornado um material com potencial interessante no estudo de reforço. Isto decorre do fato deste material ser um material totalmente reciclável e de baixo custo, além de evitar o descarte do material no meio ambiente (MENESES, 2011).

Figura 11 - Fibra de PET



Fonte: Meneses (2011)

Para Marangon (2004) o formato e as dimensões das fibras tem influência direta no desempenho do concreto. A produção das fibras pode ser feita de forma manual, com um processo de corte ou feita através de trituração, sendo que ambas não garantem com exatidão que as fibras serão uniformes. Um exemplo de fibra comumente utilizado no concreto, são as fibras usadas para a confecção de vassouras recicláveis, com dimensões entre 200 mm de comprimento e 06 mm de largura.

Pereira (2016) expõe que as características físicas da fibra, como a resistência a tração, influenciam no desempenho do concreto com adição de fibras.

Marangon (2004) destaca que as fibras de PET apresentam momentos de escoamento distintos, tendo seu valor de força de ruptura entre 23 e 25 kgf conforme Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de ruptura da fibra de PET



Fonte: Marangon (2004).

Segundo os estudos de Coró (2002) a adição de fibras de PET com comprimento entre 15, 30 e 60mm, nas proporções de 1000, 3000 e 7000 g/m³ visam estabelecer uma relação de equilíbrio entre a matriz do concreto e as propriedades mecânicas das fibras de PET.

Os resultados encontrados por Coró (2002), mostram que as fibras de PET não contribuem para o ganho de resistência a tração e compressão. Dos comprimentos e proporções utilizadas no estudo, a que apresentou melhores resultados foi a combinação de 15 mm de comprimento e 7000 g/m³ de adição. O autor indica o uso para concretos sem função estrutural, tendo em vista que a adição das fibras de PET não resultou em aumento das resistências.

Pelisser (2002) em seus estudos, realizou a adição de 0,5%, 0,18% e 0,30% sobre o volume total de concreto, e obteve resultado positivo no ganho de resistência à tração, além do aumento na tenacidade, resistência ao impacto e resistência à fissuração. No entanto as fibras de PET diminuem a trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco. O autor ainda expõe que um fator que pode reduzir o desempenho de concretos reforçados com fibras é a degradação e deterioração das fibras.

Para Betioli (2003) o objetivo da utilização das fibras de PET na matriz cimentícia é promover o aumento da sua resistência quando submetida a esforços mecânicos. Porém deve-se analisar como a interação entre as fibras PET e concreto se comporta ao passar dos anos. O autor salienta que os estudos não podem ser fixados na resistência, outras características físicas, como, controle de fissuração, absorção de impactos, rigidez e fadiga, também devem ser analisados.

O estudo da degradação das fibras de PET, está diretamente ligado ao estudo da vida útil das estruturas de concreto com adição de fibras, pois caso ocorra a deterioração das fibras de PET presentes no interior do concreto, resultará em vazios, que comprometem a durabilidade do mesmo. A deterioração das fibras de PET, podem ocorrer através de reações químicas entre a fibra e a matriz cimentícia, e ainda com reação de aditivos e reações provenientes do meio onde se tenha altas taxas de agressividade química (BETIOLI, 2003).

A falta de estudos com relação a análise dos resultados da adição de fibras de PET no concreto quando submetido ao processo de corrosão acelerada acaba fundamentando o presente trabalho. O foco é observar o comportamento das fibras oriundas do poli tereftalato de etila – PET e destacar se o material é propício para o uso, buscando determinar a trabalhabilidade, resistência mecânica, física e química com destaque para a corrosão e proteção da armadura presente no concreto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e suas características, os equipamentos que foram utilizados e os ensaios exigidos pelas normas vigentes com a finalidade de obter os resultados esperados pela pesquisa, para atender ao objetivo principal deste estudo. .

3.1 Programa Experimental

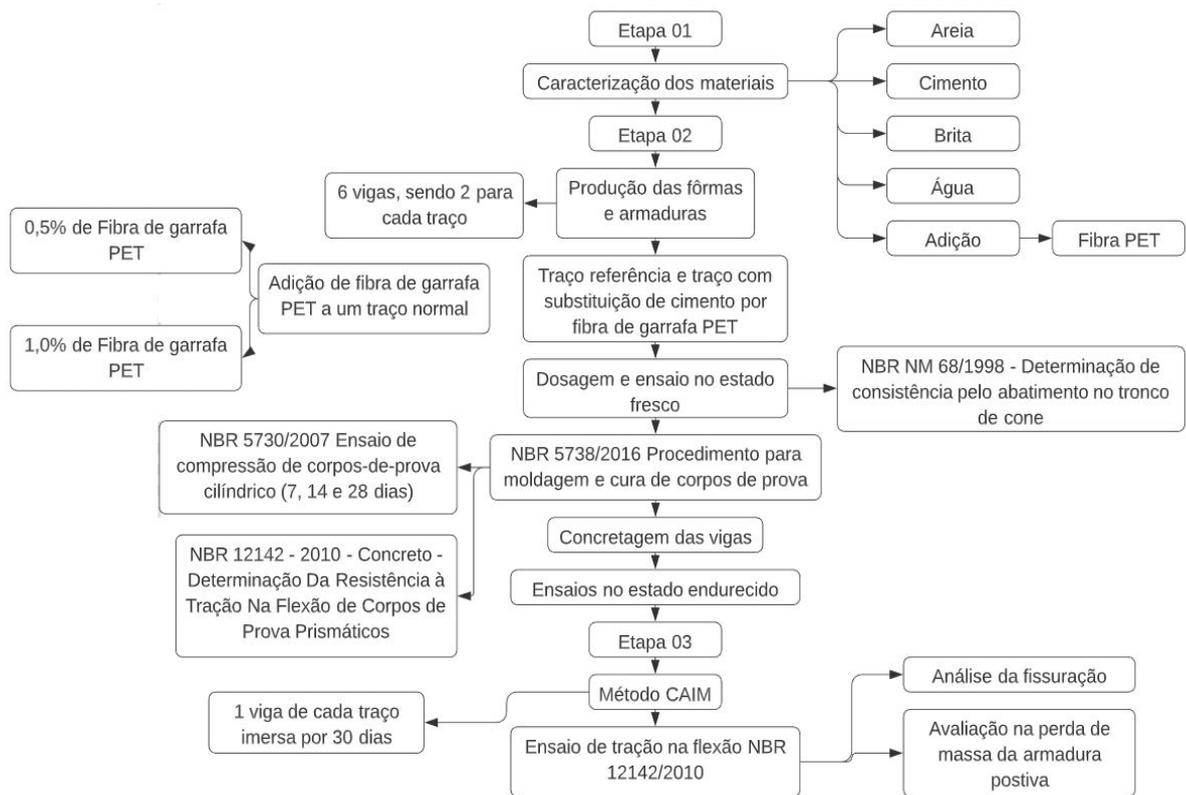
Este estudo teve como seu principal objetivo analisar o comportamento e durabilidade de vigas de concreto armado com adição de fibras de PET, submetidas à corrosão acelerada utilizando o Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada ou Método CAIM. Todos os estudos, testes, procedimentos e ensaios pertinentes serão realizados no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES.

3.1.1 Estratégia de pesquisa

Para o presente estudo foram moldadas 6 vigas em concreto armado nas dimensões de 100 cm x 15 cm x 10 cm, duas sendo o traço de referência, duas com a adição de 0,5% de fibra de garrafa PET (Polietileno Tereftalato) e 2 com adição de 1% de fibra de garrafa PET (Polietileno Tereftalato). Para cada traço moldado foram feitos 9 corpos de prova para controle da resistência à compressão e 9 corpos de prova para a resistência à flexão a 4 pontos. Todas as vigas e corpos de prova foram submetidos a um ambiente de cura controlado por 28 dias em câmara úmida. Após a cura controlada, uma viga de cada traço foi submetida à corrosão acelerada pelo método CAIM por um período de 30 dias, sendo as outras vigas foram mantidas em temperatura ambiente. Durante o período de corrosão acelerada foi observado visualmente o andamento do processo. Ao término do processo as vigas mantidas em temperatura ambiente e as vigas expostas ao método CAIM foram submetidas a todos os ensaios pertinentes, sendo eles: ensaio de resistência à tração e flexão, análise de fissuração e análise de perda de massa.

Na Figura 13 está apresentado o fluxograma do programa experimental ilustrando todas as etapas desse estudo.

Figura 13 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autor (2020)

3.2 Materiais

A seleção correta dos materiais é ponto crucial para que o concreto executado atenda a qualidade estipulada em projeto. Para isso é importante que se conheça as características dos mesmos.

3.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi a areia média que tem origem da fragmentação de quartzo. Esta areia é a mais utilizada para a construção civil e foi disponibilizada pelo LATEC - UNIVATES. Como indicam as NBR NM 248 (ABNT,

2003), NBR 52 (ABNT, 2009) e NBR 45 (ABNT, 2006), foram feitos os ensaios de granulometria e massa específica para se ter a caracterização física do material.

3.2.1.1 Determinação da Granulometria

Para a determinação da granulometria foi usada a NBR 248 (ABNT, 2002) como base. A norma aponta que deve ser usada uma amostra de 500 g do material previamente seco em uma estufa entre 105 ± 5 °C pelo tempo de 15 a 20 horas, evitando assim que a umidade possa interferir nos resultados. Na separação dos grãos deverão ser utilizadas peneiras em série normal com malhas específicas, que variam de 0,15mm até 9,5mm como é descrito na NBR NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010). Para a validação do ensaio o material deverá ser peneirado com agitação pelo tempo de 5 minutos, após, cada fração de material retido nas peneiras deverá ser pesado em balança de precisão. Com base na classificação dos grãos através do módulo de finura apresentado na NBR 7211 (ABNT, 2009), pode-se então classificar este material.

Após a realização do ensaio, com base na distribuição granulométrica do agregado (Tabela 3), foi possível estabelecer o módulo de finura e constatou-se que se trata de uma areia média.

Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo

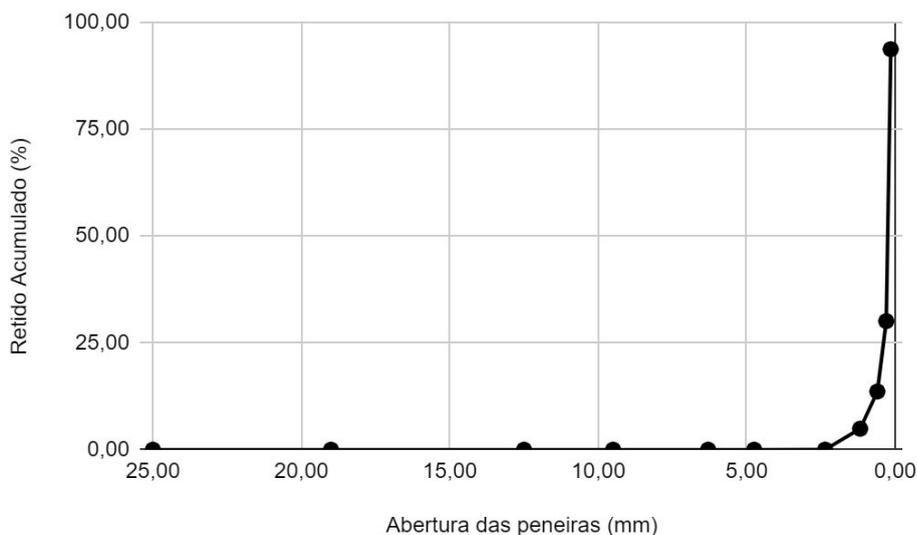
Identificação das Amostras		AREIA MÉDIA	
Abertura nominal		Retido Acumulado (%)	Retido Individual (%)
polegadas	mm		
1"	25,00	0,00	0,00
3/4"	19,00	0,00	0,00
1/2"	12,50	0,00	0,00
3/8"	9,50	0,00	0,00
1/4"	6,30	0,00	0,00
n°4	4,75	0,00	0,00
n°8	2,36	0,02	0,02
n°16	1,18	4,90	4,88

n°30	0,60	13,60	8,70
n°50	0,30	30,05	16,45
n°100	0,15	93,59	63,54
Fundo		100,00	6,41
Módulo de finura:		1,42	

Fonte: Autor (2020)

Ainda no Gráfico 3 a distribuição granulométrica do agregado pode ser observada. A ilustração faz menção ao material analisado e aos limites estudados, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2020)

3.2.1.2 Massa Específica e Massa Unitária

No que diz respeito à massa específica dos agregados miúdos, o ensaio que foi executado consiste em obter a relação entre o agregado seco em estufa e a quantidade de água que ocupa um volume igual ao total de sólidos do agregado utilizado na amostra. Este ensaio está especificado na NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Já para a massa unitária foi realizado o Método C indicado na NBR NM 45 (ABNT, 2006), que consiste em utilizar um recipiente cilíndrico vazio previamente

pesado. A seguir deve-se encher o mesmo com o material até que ele transborde, utilizando uma pá ou concha. O agregado deve ser despejado de uma altura máxima de 50mm acima da borda superior do recipiente. Após, deve-se pesar novamente o recipiente e aplicar as fórmulas descritas na norma, determinando assim a massa unitária do agregado.

Os resultados de massa específica e massa unitária obtidos após a realização dos ensaios podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 - Resultados dos ensaios do agregado miúdo.

Descrição	Areia Média
Massa Específica (g/cm ³)	2,60
Massa Espec. Aparente (g/cm ³)	-
Absorção (%)	-
Massa Unitária (g/cm ³)	1,49

Fonte: Autor (2020)

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado para a produção do concreto foi o CP V - ARI da marca CIMPOR. Segundo a própria marca o cimento atende todas especificações da NBR 16697:47 Cimento Portland - requisitos (ABNT, 2018). A escolha da marca e classificação do cimento se deram por ser o mais vendido na cidade de Lajeado. O cimento foi fornecido pelo LATEC.

Para a massa específica, foi realizado o ensaio do frasco volumétrico de Le Chatelier, no qual o volume de um corpo é medido através do deslocamento de um líquido. Este ensaio está descrito na NBR 16605:2017 Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. O ensaio foi realizado a fim de comprovar a informação disponibilizada pelo fornecedor, e chegou-se no resultado de 2,99 g/cm³.

3.2.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa foi a brita 1 que tem origem da fragmentação do basalto. Está brita é a mais recomendada para concretos em geral e foi disponibilizada pelo LATEC - UNIVATES. Como indicam as NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR 53 (ABNT, 2009), foram realizados os ensaios de granulometria e massa específica para se ter a caracterização física do material.

3.2.3.1 Determinação da Granulometria

Para a determinação da granulometria foi usada a NBR 248 (ABNT, 2002) como base. A norma aponta que deve ser usada uma amostra de 1000 g do material previamente seco em uma estufa entre 105 ± 5 °C pelo tempo de 15 a 20 horas, evitando assim que a umidade possa interferir nos resultados . Na separação das britas foram utilizadas peneiras em série normal com malhas específicas, que variam de 4,75 mm até 19,0 mm. Para a validação do ensaio o material foi peneirado com agitação pelo tempo de 5 minutos. Após, cada fração de material retido nas peneiras foi pesado em balança de precisão e então realizada a distribuição granulométrica.

Após a realização do ensaio, a fração de material retido em cada peneira foi pesada, o que permitiu a distribuição granulométrica da amostra, conforme a Tabela 4.

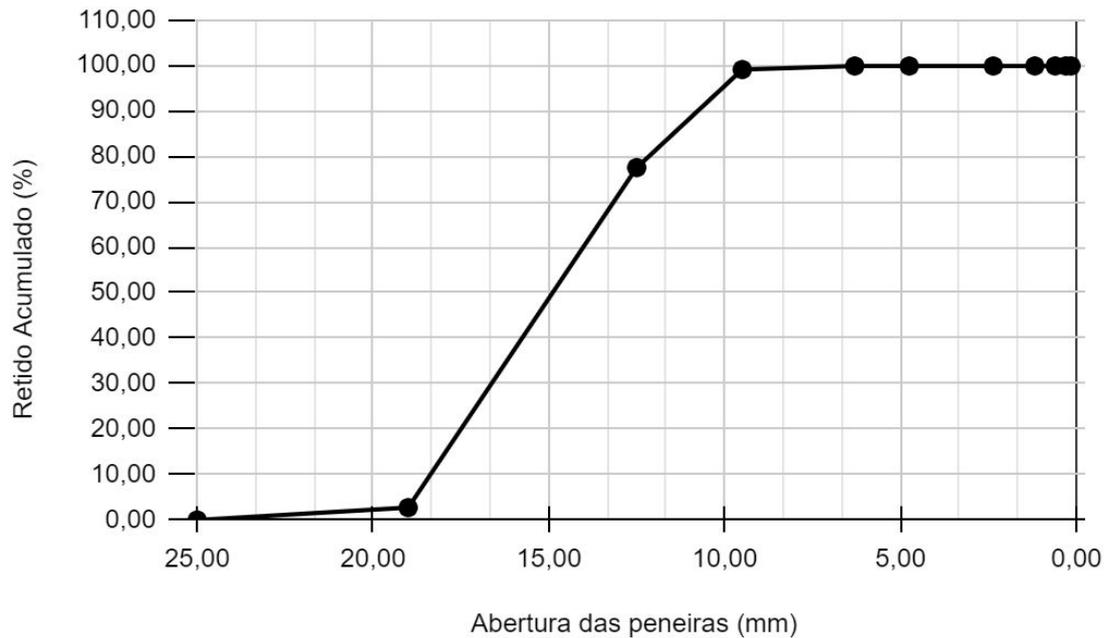
Tabela 4 - Granulometria do agregado graúdo

Identificação das Amostras		BRITA 1	
Abertura nominal		Retido Acumulado (%)	Retido Individual (%)
polegadas	mm		
1"	25,00	0,00	0,00
3/4"	19,00	2,72	2,72
1/2"	12,50	77,48	74,76
3/8"	9,50	99,03	21,55
1/4"	6,30	99,82	0,79
n°4	4,75	99,82	0,00
n°8	2,36	99,82	0,00
n°16	1,18	99,83	0,00
n°30	0,60	99,83	0,00
n°50	0,30	99,83	0,00
n°100	0,15	99,83	0,00
Fundo		100,00	0,17

Fonte: Autor (2020).

Ainda no Gráfico 4 a distribuição granulométrica do agregado pode ser observada. A ilustração faz menção ao material analisado e aos limites estudados, conforme a NBR 248 (ABNT, 2002).

Gráfico 4 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2020)

3.2.3.2 Massa Específica e Massa Unitária

Para a determinação da massa específica a norma que foi usada é a NBR NM 53 (ABNT, 2009). Nela está exposto que o ensaio deve ser realizado observando a diferença de peso entre o material submerso, o material seco em estufa e o material saturado porém com a sua superfície seca.

Já para a massa unitária foi realizado o Método C indicado na NBR NM 45 (ABNT, 2006), que consiste em utilizar um recipiente cilíndrico vazio previamente pesado. A seguir deve-se encher o mesmo com o material até que ele transborde. Utilizando uma pá ou concha, o agregado deve ser despejado de uma altura máxima de 50mm acima da borda superior do recipiente. Após, deve-se pesar novamente o recipiente e aplicar as fórmulas descritas na norma. Assim é possível obter a massa unitária do agregado.

Os resultados de massa específica e massa unitária obtidos após a realização dos ensaios podem ser observados na Quadro 7.

Quadro 7 - Resultados dos ensaios do agregado graúdo.

Descrição	Brita 1
Massa Específica (g/cm ³)	2,95
Massa Espec. Aparente (g/cm ³)	2,74
Absorção (%)	2,40
Massa Unitária (g/cm ³)	1,37

Fonte: Autor (2020).

3.2.4 Água de Amassamento

A água utilizada para o amassamento do concreto foi proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Lajeado - RS. A empresa responsável pelo abastecimento é a CORSAN. Segundo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), as águas distribuídas pelas empresas de abastecimento não necessitam de ensaios, pois são consideradas adequadas para a utilização na fabricação de concreto.

3.2.5 Fibra de Polietileno Tereftalato ou PET

As fibras de polietileno tereftalato ou PET que foram utilizadas na pesquisa são provenientes da reciclagem das garrafas PET's e foram cortadas manualmente. Para este trabalho foram adotadas as dimensões médias de 5mm de largura, 15 mm de comprimento e 0,2 mm de espessura, conforme Figura 13 , visto que, como se trata de um corte manual e artesanal, pode haver pequenas diferenças nas medidas do material picotado.

O estudo foi realizado adicionando 0,5% e 1,0% de material reciclado sobre o traço referência. A massa específica do PET segundo FRADOS (1976) é 1,370 kg/m³.

Figura 13 - Dimensões da Fibra PET



Fonte: Autor (2020)

3.3 Produção das Vigas

3.3.1 Formas

As formas utilizadas possuem dimensões de 100 x 15 x 10 cm, e foram produzidas com MDF liso, a fim de evitar imperfeições nas faces e foram parafusadas para garantir melhor trabalhabilidade na hora da desforma e maior estanqueidade. Foram produzidas 6 formas, sendo 02 para traço referência, 02 para o traço com adição de 0,5% de PET e 02 para o traço com adição de 1,0% de PET conforme Figura 14.

Figura 14 - Fôrmas em MDF

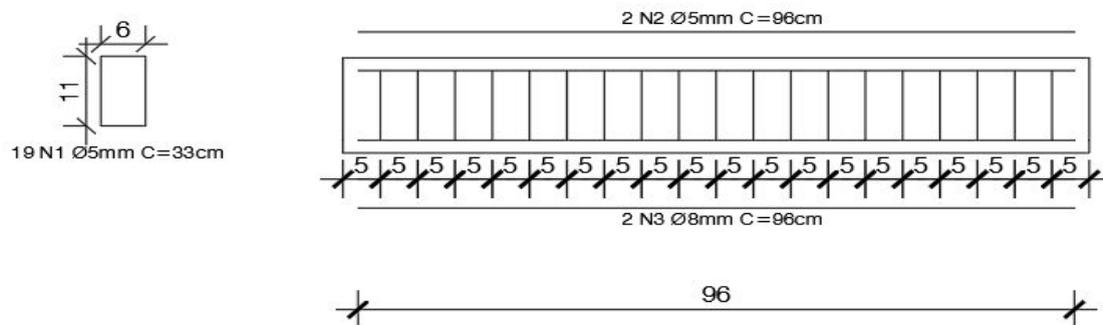


Fonte: Autor (2020)

3.3.2 Armadura

As armaduras utilizadas na produção das vigas foram de aço CA 50 e CA 60. Estas barras apresentam resistência de 500 MPa e 600 MPa respectivamente. As armaduras foram dispostas utilizando barras de aço CA 60 de $\varnothing 5$ mm nos estribos, espaçados a cada 5 cm, totalizando 19 estribos, aço CA 50 de $\varnothing 8$ mm nas armaduras positivas e aço CA 60 de $\varnothing 5$ mm nas armaduras negativas, conforme Figura 15. O dimensionamento foi feito por Battisti (2017) baseado na NBR 6118 (ABNT, 2014), utilizando a classe de agressividade II, que determina cobrimento nominal de 20 mm.

Figura 15 - Detalhamento da armadura



Fonte: Adaptado pelo Autor com base em Battisti (2017)

Para a produção das ferragens dos estribos foi utilizada uma morsa de bancada, mesa de dobras, máquina de corte e torquês (ferramenta manual utilizada para amarração). Os cantos dos estribos devem ser isolados para que na etapa de corrosão acelerada eles não tenham contato direto com a armadura transversal, o que acabaria aumentando o corrosão da armadura (FIGURA 16).

Figura 16 - Estribos finalizados



Fonte: Autor (2020)

Na montagem das armaduras, os locais dos estribos foram marcados com antecedência. Para isso foi utilizado uma trena e giz. Posteriormente os estribos foram amarrados às armaduras longitudinais por meio de arame recozido, conforme Figura 17. Além disso as armaduras tiveram seus diâmetros medidos com o auxílio de um paquímetro para posterior análise da perda de massa.

Figura 17 - Montagem da armadura



Fonte: Autor (2020)

Feita a montagem das armaduras o passo seguinte é preparar as mesmas para o ensaio do Método CAIM. Essa preparação foi feita adicionando barras de cobre nas armaduras positivas, visto que este processo permitirá que ocorra a diferença de potencial necessárias para o ensaio. É importante salientar que os arames utilizados na amarração foram isolados, a fim de que não se tivesse perda de seção localizada nas barras (FIGURA 18).

Figura 18 - Posicionamento dos fios de cobre nas armaduras positivas



Fonte: Autor (2020)

Após a finalização das armaduras, as mesmas foram mantidas em ambiente livre da ação de água e umidade, a fim de evitar o processo de corrosão(FIGURA 19).

Figura 19 - Armaduras finalizadas.



Fonte: Autor (2020)

Para o processo de concretagem todas as fôrmas apresentadas na Figura 14, receberam a adição de solução desmoldante para facilitar o processo de desforma. Ainda para que o posicionamento das armaduras nas formas respeitasse o projetado, foram utilizados espaçadores plásticos (FIGURA 20).

Figura 20 - Espaçadores plásticos nas fôrmas e armaduras



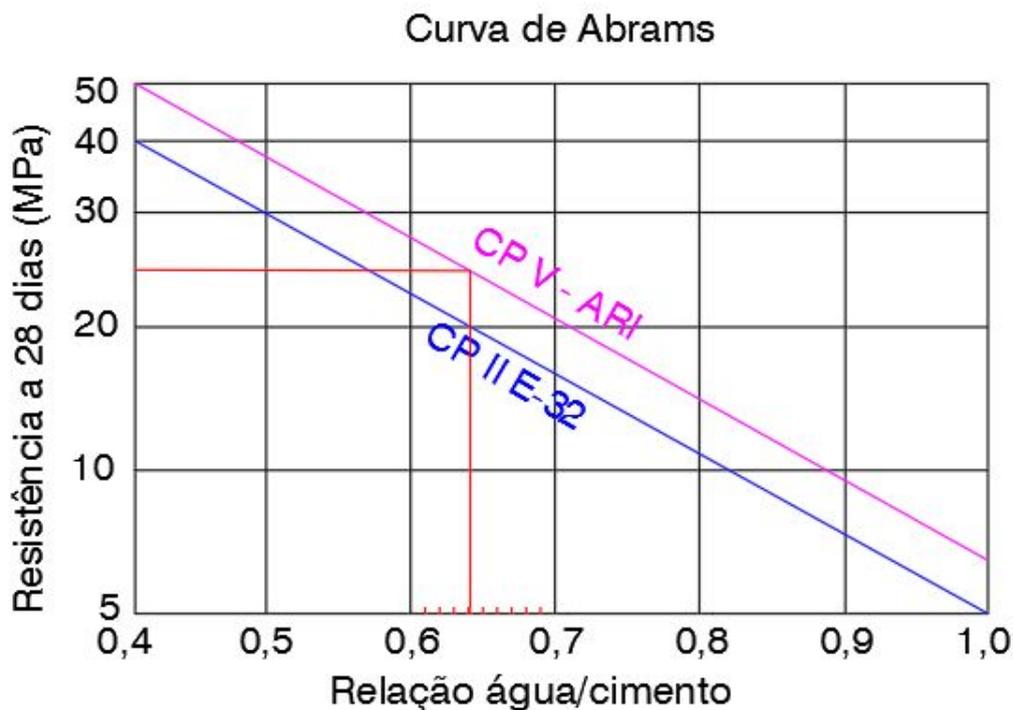
Fonte: Autor (2020)

3.3.3 Dosagem e Moldagem do Concreto

A dosagem do concreto foi determinada pelo método ABCP. Este método é utilizado para definir a relação A/C através das características dos materiais utilizados e da resistência desejada. Foi usado como base para a determinação da dosagem uma resistência de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, que segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) é considerada a resistência mínima para que o concreto seja caracterizado como estrutural.

A relação A/C foi determinada utilizando a Curva de Abrams do cimento, que é a relação entre a resistência do concreto requerida e a resistência do concreto atingida em 28 dias. Para um concreto de 25 MPa a relação A/C foi de 0,64 como é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Curva de Abrams para cimento



Fonte: Adaptado pelo Autor baseado em ABESC (2016).

O consumo de cimento para o traço tem ligação direta com o consumo de água requerida para a mistura. Já o consumo de água está diretamente ligado ao abatimento de cone requerido e o diâmetro máximo do agregado graúdo. Para este trabalho foram adotados $D_{\text{máx}}$ agregado graúdo de 19 mm e abatimento entre 60 a 80 mm, resultando em um consumo de água (C_a) de 200 L/m³

A quantidade de cimento (C) expressa em kg/m³ é determinada pela razão entre o consumo de água (C_a) e a relação água/cimento (A/C), como apresentado na Equação 1.

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

Com isso o resultado encontrado para o cimento é de 312,50 kg/m³.

O agregado graúdo que compõe o traço, foi determinado tendo como base o módulo de finura do agregado miúdo, a dimensão máxima do agregado graúdo, volume do agregado máximo por m³ de concreto e pela massa unitária compacta do agregado graúdo (M_c). A equação que determina o consumo de agregado graúdo (C_b) é expressa na Equação 2.

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

Com base nos dados obtidos para este trabalho e já apresentados anteriormente, foram encontrados os valores de V_c : 0,81 e M_c : 1370 kg/m³, obtendo-se então um consumo de agregado graúdo de 1109,70 kg/m³.

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

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

Onde:

- C_c : Consumo de cimento;
- C_b : Consumo de brita;

- Ca: Consumo de areia;
- γ_c : Massa específica do cimento;
- γ_b : Massa específica da brita;
- γ_m : Massa específica da areia;
- γ_a : Massa específica da água.

Assim, resolvendo a equação, obteve-se o consumo de areia de 830,22 Kg/m³.

Segundo o método ABCP, o traço unitário é dado pela razão entre o consumo de cada material utilizado (cimento, areia, brita e água) pelo consumo de cimento, como pode ser observado na Equação 4.

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

Por fim, o traço unitário obtido foi de 1:2,66:3,55 a/c:0,64 (cimento, areia, brita e água), a fim de garantir a resistência de 25 MPa esperada. A moldagem das vigas foi executada em 3 traços distintos, um traço referência, um traço com adição de 0,50% de fibras de garrafa PET e um traço com adição de 1,0% de fibras de garrafa PET. A porcentagem de fibra arbitrada foi sob o volume total de concreto utilizado.

Com o traço definido, foi possível determinar a quantidade necessária de cada material para a execução de cada um dos traços, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantitativo de materiais por traço.

Traço	Materiais (Kg)				
	Cimento	Areia	Brita	Água	Fibra de PET
Traço Referência	26,77	71,13	95,07	13,39	0,00
Adição de 0,50% de Fibra PET	26,77	71,13	95,07	13,39	0,53
Adição de 1,00% de Fibra PET	26,77	71,13	95,07	13,39	1,06

Fonte: Autor (2020)

3.3.4 Moldagem dos elementos de concreto

Os três traços (referência, com adição de 0,50% de fibra de PET e com adição de 1,00% de fibra de PET) foram produzidos em betoneira e lançados em uma única etapa. Antes do lançamento foi realizado o ensaio para determinação do abatimento do concreto, mais conhecido como Slump Test. Esse teste está descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998).

O Slump Test consiste em um tronco de cone com diâmetro de 10 cm inferior e 20 cm superior com uma altura de 30 cm, e representa a adição do concreto em 3 etapas, com uma sucessão de 25 golpes em cada etapa com uma barra de 16 mm de diâmetro. Finalizada as 3 etapas o cone é retirado e mede-se a altura da ponta do concreto até a ponta do cone. A Figura 22 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 22 - Slump test



Fonte: Autor (2020).

Finalizado o teste de abatimento do concreto, foram concretadas 02 vigas em etapa única para cada traço. Para garantir um perfeito adensamento do concreto foi utilizado um vibrador por imersão. Nesta etapa também foram moldados 09 corpos de prova (03 para cada idade) para determinação da resistência à compressão no estado endurecido de cada um dos traços, conforme indicado na NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016). Os corpos de prova possuem tamanho padrão de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e foram moldados em 02 etapas, desferindo 13 golpes a cada etapa. Além dos cilíndricos foram moldados 3 corpos de prova prismáticos nas dimensões de 20 cm x 50 cm, para verificação da flexão a 4 pontos. Diferentemente dos cilindros, os prismáticos foram ensaiados apenas na idade de 28 dias. A Figura 23 (a), Figura 23 (b) e Figura 23 (c), ilustram os elementos de concreto moldados.

Figura 23 - Elementos de concreto moldados.



Fonte: Autor (2020)

Nota: A Figura (A) apresenta um exemplar de vigas concretadas, a Figura (B) indica os corpos de prova prismáticos concretos e a Figura (C) representa as corpos de prova cilíndricos concretados.

3.3.5 Cura do Concreto

Finalizada a moldagem das vigas e dos corpos de prova, a cura foi realizada em duas etapas, sendo a primeira com duração de 24 horas em local seco, liso e livre de intempéries. Já a segunda etapa foi na câmara úmida do laboratório da UNIVATES, LATEC, como mostram as Figuras 24 e 25. Lá os corpos de prova permaneceram até as idades para a realização dos ensaios de compressão, sendo

elas 07, 14 e 28 dias. As vigas por sua vez ficaram até a idade de 28 dias, quando foram retiradas para dar início ao ensaio de corrosão acelerada - Método CAIM.

Figura 24 - Vigas no processo de cura úmida.



Fonte: Autor (2020)

Figura 25 - CP's cilíndricos e prismáticos no processo de cura úmida



Fonte: Autor (2020)

3.4 Ensaios para Controle do Concreto.

3.4.1 Resistência à Compressão Simples

A resistência à compressão simples seguiu as diretrizes estipuladas pelas NBR 7215 (ABNT, 2019) e NBR 5739 (ABNT, 2018). Estas normas delimitam que os corpos de prova devem ser rompidos com idades de 07, 14 e 28 dias.

O ensaio foi realizado nos 3 corpos de prova para cada idade e para cada traço, com auxílio da prensa hidráulica Emic 200 PLUS disponível no (LATEC), conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Ensaio de compressão

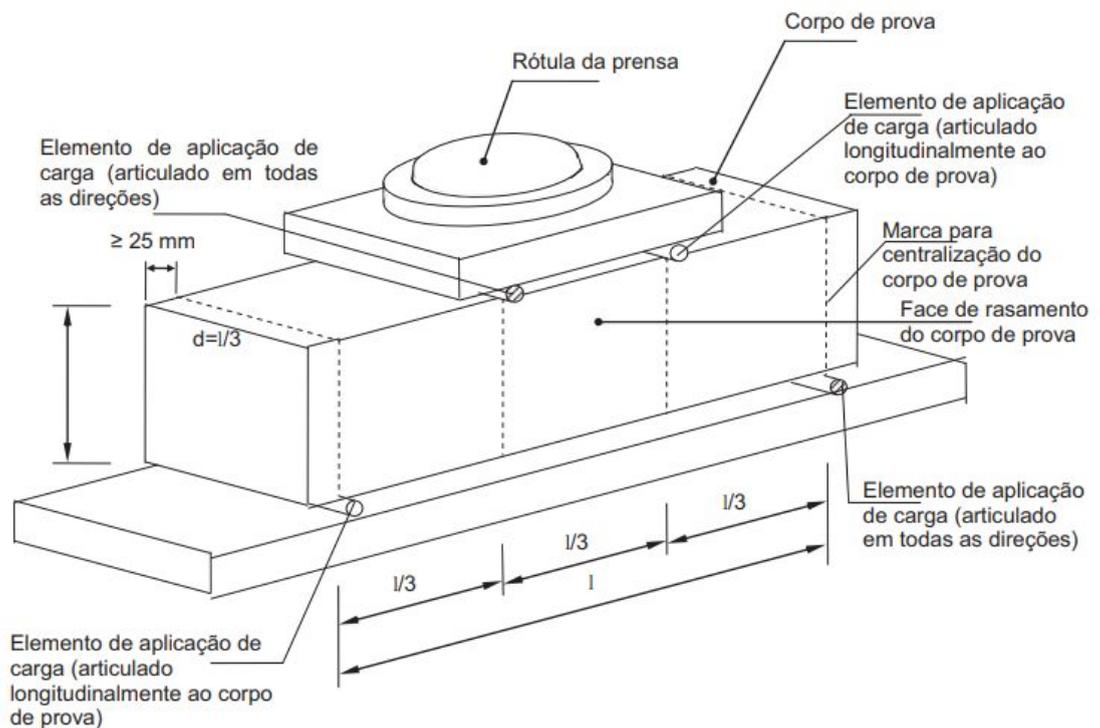


Fonte: Autor (2020)

3.4.2 Resistência à Tração na Flexão

Além da compressão simples foi executado o ensaio de flexão a 4 pontos. A NBR 12142 (2010) delimita que o vão entre os apoios inferiores deve ter dimensão L e que o vão entre os apoios superiores $L/3$. A aplicação da carga deve ser feita no terço médio do vão e com auxílio de um anel rotulado. Ainda os apoios devem permitir qualquer deslocamento dos corpos de prova. A Figura 27 exemplifica o ensaio.

Figura 27 - Ensaio de flexão em 4 pontos



Fonte: NBR 12142 (2010)

O ensaio foi realizado para 1 corpo de prova de cada traço, na idade de 28 dias. A Figura 28 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 28 - Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autor (2020)

3.5 Corrosão acelerada por imersão modificada - Método CAIM

O ensaio de corrosão se iniciou após a finalização do período de cura das vigas de concreto armado, ou seja, no vigésimo nono dia. Neste dia foram colocadas em imersão parcial numa solução de íons cloretos que busca se assemelhar à água salgada do mar, 03 das 06 vigas, sendo 01 com traço referência, 01 com adição de 0,5% de fibra de garrafa PET e 01 com 1,0% de fibra de garrafa PET. É importante salientar que as vigas de concreto armado ficaram em soluções independentes. A solução de cloretos aliada a diferença de potencial criada pelas barras de cobre ligadas a uma fonte elétrica, induziram a migração dos íons cloreto para as barras de aço, criando o processo de corrosão.

Para que ocorresse a diferença de potencial as vigas ficaram imersas até 5 cm de altura, com a solução de cloreto cobrindo a armadura positiva. O fio de cobre que foi adicionado nas armaduras anteriormente foi ligado a uma fonte alimentadora como polo positivo, atuando como ânodo, enquanto o fio que passava por fora das vigas se ligou na fonte no polo negativo atuando como cátodo.

Para garantir que o processo de corrosão acontecesse da mesma forma em todas as vigas, com corrente contínua e constante, as matrizes foram ligadas em série. Este processo também permitiu que fosse usado apenas uma fonte alimentadora, como pode-se observar na Figura 29 .

Figura 29 - Estrutura do sistema de ligação



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Berton (2019)

Segundo Graeff (2007) a taxa de corrente constante mais adequada para os ensaios, corresponde a $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. A autora assegura que esta corrente garante um maior controle da corrosão. A autora ainda salienta que a determinação da corrente está diretamente ligada ao diâmetro da barra de aço. Neste caso, para uma barra de $\varnothing 8\text{mm}$, a corrente ideal a ser usada é 250 mA. Para o ensaio ainda foi determinado que a solução deve conter 35g/L de NaCl (sódio) e que o objeto de estudo deve permanecer imerso na solução por no mínimo 30 dias.

Para a realização do ensaio foi necessário montar 3 novas fôrmas de MDF independentes. Nelas foi adicionada uma camada de plástico resistente que serviu como impermeabilizante. Sobre o plástico foram adicionados espaçadores plásticos, a fim de garantir que a solução de NaCl conseguisse envolver toda a viga, e ainda protefeu o plástico do atrito com as vigas, impedindo que o material rasgasse.

Durante 30 dias as vigas ficaram no processo de corrosão acelerada e o andamento do ensaio pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 - Andamento do ensaio de corrosão acelerada.



1° dia



10° dia



20° dia

Fonte: Autor (2020)



30° dia

Com a conclusão do ensaio de corrosão, a fim de facilitar o prosseguimento do estudo cada viga recebeu uma nomenclatura, como pode ser observado no Quadro 8.

Quadro 8 - Nomenclatura adotada para as vigas

Descrição	Nomenclatura
Referência sem corrosão	RSC
Adição 0,5% de fibra de PET sem corrosão	A0,5SC
Adição 1,0% de fibra de PET sem corrosão	A1,0SC
Referência com corrosão	RCC
Adição 0,5% de fibra de PET com corrosão	A0,5CC
Adição 1,0% de fibra de PET com corrosão	A1,0CC

Fonte: Autor (2020)

3.6 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Para os cálculos da resistência à tração na flexão deve se ter como base a NBR 12142 (ABNT, 2010). Ela indica que para cada localização da ruptura deve ser adotada uma fórmula de cálculo distinta. Para ruptura localizadas no terço médio do vão, a resistência à tração na flexão é dado por $f_{ct,f} = \frac{F.l}{b.d^2}$. Já para rupturas fora do terço médio, em que a distância seja $\leq 5\%$ de L (distância entre apoios), a resistência é dada por $f_{ct,f} = \frac{3.F.a}{b.d^2}$, onde:

F: força máxima registrada no ensaio (N);

l: dimensão entre apoios (mm);

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

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

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

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado nas 06 vigas estudadas, sendo 03 vigas submetidas ao processo de corrosão acelerada e 03 vigas mantidas em local neutro.

3.6.1 Análise da Fissuração

Concluído o teste de resistência à tração na flexão foram analisadas as fissuras ocasionadas pelo mesmo. Para isso, foi realizado um mapeamento do local e espessuras das fissuras, sendo o registro das espessuras foi feito com auxílio de um fissurômetro.

3.6.2 Determinação da Perda de Massa

O último ensaio que foi realizado é a determinação da perda de massa. Para isso foi retirada a capa de concreto das vigas submetidas ao processo de corrosão acelerada até que as armaduras positivas estivessem totalmente a mostra.

A segunda etapa do ensaio consistiu em medir a perda de massa das armaduras. Este processo foi executado com o auxílio de um paquímetro. Após as medições comparou-se os diâmetros encontrados com os diâmetros das barras medidas antes da concretagem, como foi mencionado no item 3.3.2.

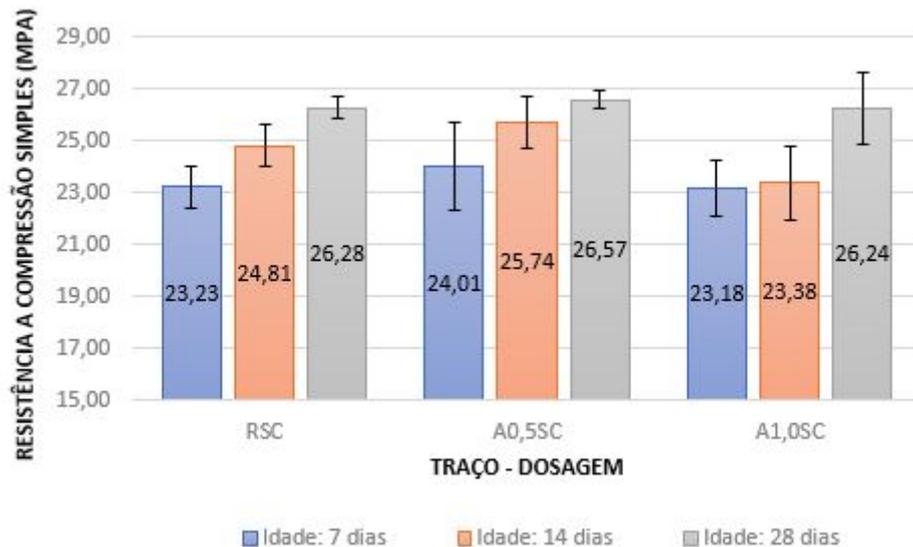
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados em todos corpos de prova confeccionados , analisando os elementos submetidos e não submetidos ao processo de corrosão, ainda foi avaliado o potencial de ganho ou não de resistência da fibra de PET.

4.1 Resistência à compressão simples

No Gráfico 5 estão apresentados os resultados obtidos na resistência mecânica à compressão simples dos corpos de prova de todos três traços executados.

Gráfico 5 - Resistência à compressão simples do concreto



Fonte: Autor (2020)

Com base nos dados obtidos é possível observar que a resistência à compressão dos corpos de prova aumenta com o ganho de idade. Este resultado já era esperado visto que, o cimento apresenta um ganho de resistência com o passar do tempo.

Ainda constatou-se que a adição de fibras de garrafa PET nas proporções de 0,50% e 1,00% sobre o traço referência, não contribuiu com o ganho de resistência à compressão simples, visto que, em todas as idades os três traços obtiveram valores de resistência muito próximos. Coró (2002) em seus estudos já havia chegado à conclusão que a fibra de PET não contribui no ganho de resistência à tração e compressão, desaconselhando o seu uso em peças de concreto, submetidas a esforços estruturais.

Pelisser (2002) aponta que para adições com baixa porcentagem de fibra de PET e com comprimentos de até 20 mm, a mistura não apresenta ganhos significativos na resistência à compressão.

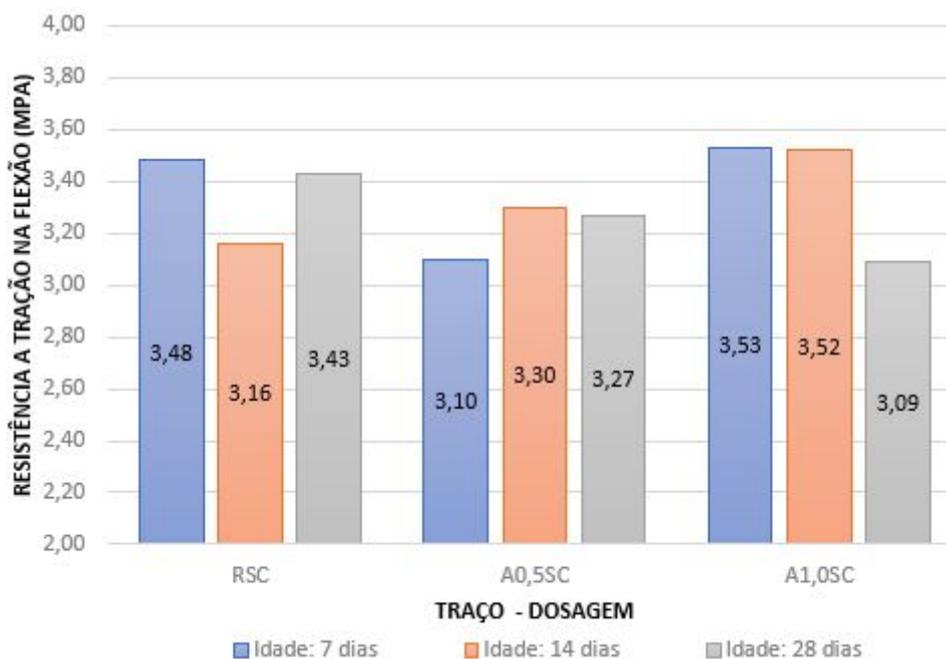
A falta de ganho de resistência à compressão pode estar associada como o modelo de fibra empregado, uma vez que, as fibras diminuem a trabalhabilidade do concreto e tendem a diminuir a sua resistência. Entretanto, estas costumam

apresentar melhores resultados no combate à fissuração, e ainda tem a função de aumentar a ductilidade do concreto, ou seja, fazer com que este aguarde por mais tempo a mesma carga.

4.2 Resistência à tração na flexão

O Gráfico 6, apresenta os resultados obtidos nos corpos de prova prismáticos.

Gráfico 6 - Resistência à tração na flexão - Corpos de prova prismáticos



Fonte: Autor (2020)

Com base nos dados analisados é possível observar que as fibras de PET apresentaram um comportamento inferior no que tange a resistência à tração na flexão das peças de concreto, uma vez que, na idade de 28 dias, os corpos de prova com adição de 0,50% e 1,00% de fibra de PET, apresentam um decréscimo de resistência na casa de 4,89% e 11,00% respectivamente. Já para idades de 7 e 14 dias as amostras com adição de fibras de PET apresentaram resultados positivos se comparadas as vigas referência.

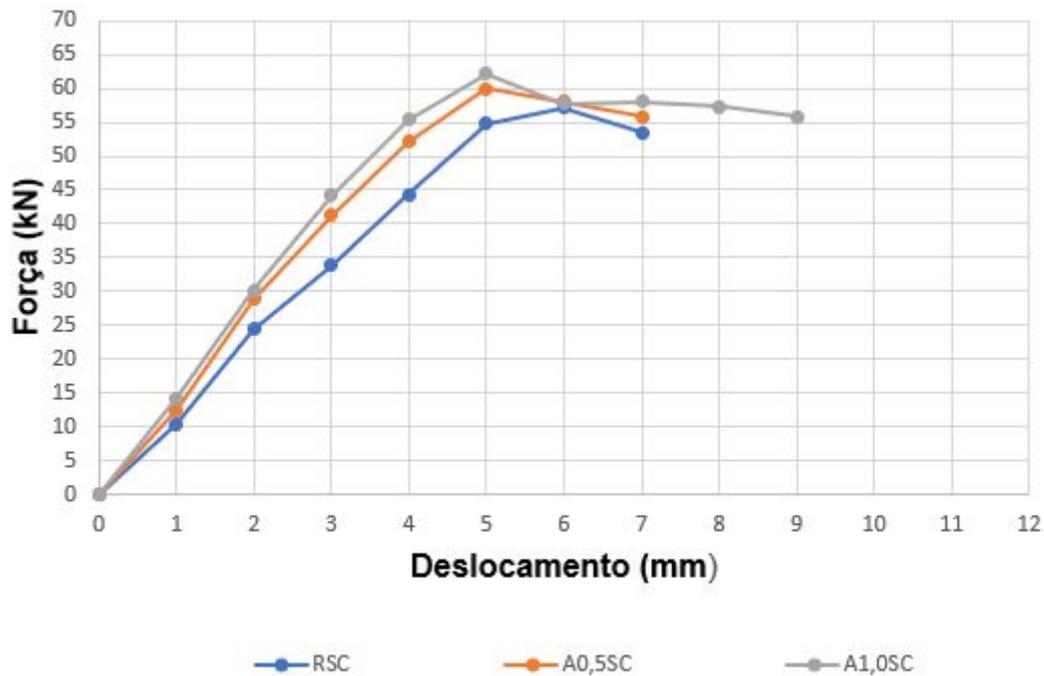
A porcentagem de perda de resistência foi calculada tendo como base a resistência obtida no traço referência. Estes resultados podem estar relacionados com a falta de aderência entre a matriz cimentícia e a fibra de PET. Ainda é possível notar que existe uma tendência de ganho de resistência ligada ao aumento da porcentagem de fibra de PET na mistura. Coró (2012) obteve resultados semelhantes, mostrando que em seus experimentos as adições não apresentaram ganhos de resistência à tração, porém, segundo o próprio autor, quanto maior for a adição e menor for o comprimento das fibras de PET, maior será a resistência alcançada.

Para o aumento da resistência nas idades iniciais Rodrigues et al. (2017) explica que este fator pode estar ligado a característica da fibra de ser um reforço e ponte de transferência para os esforços aplicados.

De acordo com Araújo e Coelho (2019) a queda de resistência conforme se aumenta a porcentagem de adição das fibras podem estar ligada ao aparecimento de vazios na mistura proveniente da elevada quantidade de fibras de PET.

Já o resultado obtido na resistência à tração na flexão das seis vigas pode ser observado nos Gráfico 7 e 8. No Gráfico 7 estão apresentadas as vigas que não passaram pelo processo de corrosão acelerada e no Gráfico 8 as vigas que foram submetidas a corrosão acelerada.

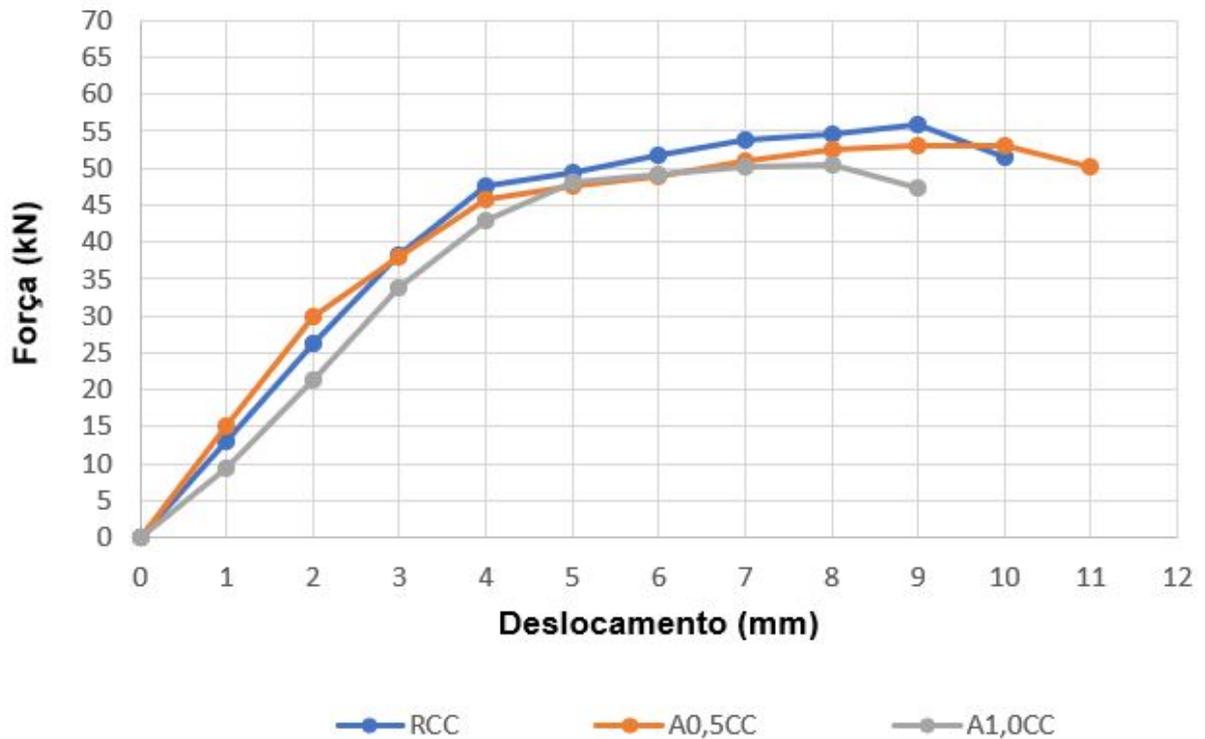
Gráfico 7 - Resistência à tração na flexão - vigas sem corrosão



Fonte: Autor (2020)

Com base nos dados analisados no Gráfico 7, analisando a curva força x deslocamento, observou-se que as vigas com adição de 0,50% (A0,5SC) e 1,00% (A1,0SC) de fibra de PET, tiveram seu pico de resistência máxima com 5 mm de deslocamento, enquanto a viga referência sem adição de fibra de PET (RSC) apresentou seu pico de resistência máxima no deslocamento de 6 mm. Ainda das 3 vigas sem corrosão a que apresentou a maior resistência (62,10 kN) foi a A1,0SC, ficando 3,38% superior a viga A0,5SC e 8,05% superior a viga RSC. Além disso quando observado o comportamento da resistência associada ao deslocamento, a viga com adição de 1,00% de fibra de PET apresentou melhores resultados, uma vez que após o rompimento e aparecimento das primeiras fissuras, a viga em questão ainda conseguiu manter a resistência por um período superior as outras vigas analisadas, atingindo um pico de 9 mm de deslocamento e uma resistência de 55,8 kN.

Gráfico 8 - Resistência à tração na flexão - vigas com corrosão



Fonte: Autor (2020)

No Gráfico 8 pode ser analisada a curva de força x deslocamento para as vigas submetidas ao processo de corrosão acelerada. É possível observar que as três vigas demonstraram comportamento semelhante em resistência e deslocamento. A viga com adição de 1,0% de fibra de PET (A1,0CC) obteve seu pico de resistência com um deslocamento de 8 mm. A viga referência (RCC) foi a que apresentou o maior pico de resistência, porém após atingir sua carga máxima teve uma queda brusca de resistência, enquanto a viga com adição de 0,5% de PET (A0,5CC) foi a que apresentou uma perda de resistência mais uniforme, após atingir seu pico máximo de resistência, se comparada com as demais vigas.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados de carga máxima de ruptura e flecha máxima de cada viga ensaiada.

Tabela 6 - Resistência à tração na flexão

Viga	Carga de Ruptura (kN)	Flecha máxima (mm)
RSC	57,10	7,00
A0,5SC	60,00	7,00
A1,0SC	62,10	9,00
RCC	56,00	10,00
A0,5CC	52,90	11,00
A1,0CC	50,50	9,00

Fonte: Autor (2020)

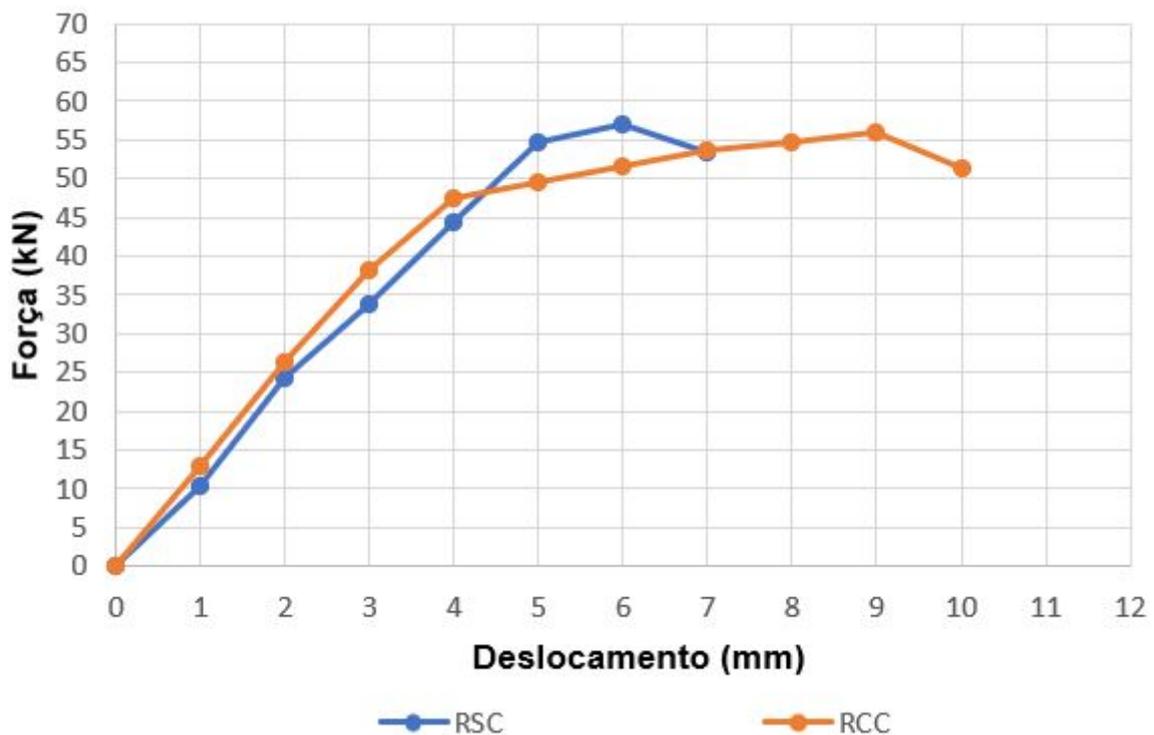
As vigas com adição de fibra de PET (A0,5SC e A1,0SC) que não passaram pelo processo de corrosão apresentaram uma maior resistência quando comparadas a viga referência sem corrosão (RSC). Diferentemente dos resultados obtidos na resistência à compressão, na resistência à tração a adição apresentou ganho de resistência. Este resultado pode ser explicado pois as fibras normalmente resistem mais quando expostas a esforços de tração. Este fenômeno é explicado por Bentur e Mindess (1990) onde os autores explicam que o aumento da resistência de concretos com adição de fibras de polipropileno é resultante da maior resistência a fissuração que o material garante a mistura.

Já ao analisar as vigas submetidas ao método CAIM, é possível observar um decréscimo de resistência ao comparar com as vigas que não passaram pelo processo de corrosão. A viga referência (RCC) apresentou 1,96% de redução. Já na viga com 0,5% de fibra de PET (A0,5CC) a redução de resistência foi de 13,42%, enquanto a viga com 1,0% de fibra de PET, foi a que apresentou a pior queda de resistência, alcançando uma perda de 22,97%. Esta perda de resistência é associada a perda de massa das barras de aço, causadas pelo processo de corrosão, sendo que o melhor desempenho da viga referência é dado pela menor perda de massa das armaduras. Deste modo é possível perceber que apesar da adição da fibra de PET apresentar um ganho de resistência no que tange os esforços de tração na flexão, a adição não é eficaz para combater o processo de corrosão e perda de massa das armaduras. No entanto como já citado

anteriormente, a característica dúctil das fibras faz com que as vigas com adição, apesar de apresentarem resistências inferiores, adquiram uma flecha superior, ou seja, esta faz com que as vigas resistam por mais tempo antes do rompimento.

Nos Gráficos 9, 10 e 11, são apresentadas as curvas de força x deslocamento de cada grupo de amostra, onde sua resistência e deslocamento são analisados separadamente.

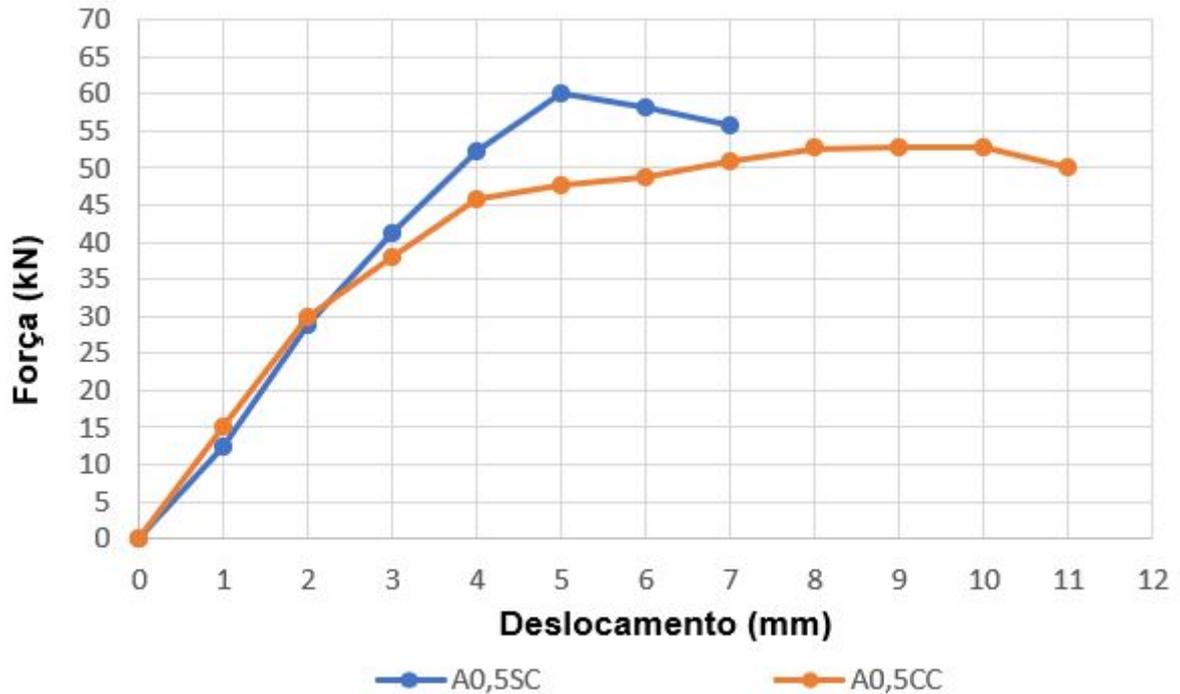
Gráfico 9 - Resistência à tração na flexão - vigas referência



Fonte: Autor (2020)

No Gráfico 9, são expostas as curvas força x deslocamento das duas vigas referência (RSC e RCC), onde pode ser observada uma expressiva diferença no deslocamento máximo e resistência entre as vigas. As duas vigas apresentaram resultados semelhantes até atingirem um deslocamento de 4 mm, onde neste ponto a viga referência sem corrosão (RSC) passa a atingir resistências superiores, tendo sua resistência máxima no deslocamento de 6 mm, enquanto a viga submetida ao processo de corrosão acelerada, apesar de apresentar uma resistência inferior, consegue resistir por mais tempo, tendo seu pico de resistência no deslocamento de 9 mm. A resistência inferior pode ser explicada pela perda de seção das armaduras.

Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão - vigas com adição de 0,50% de PET

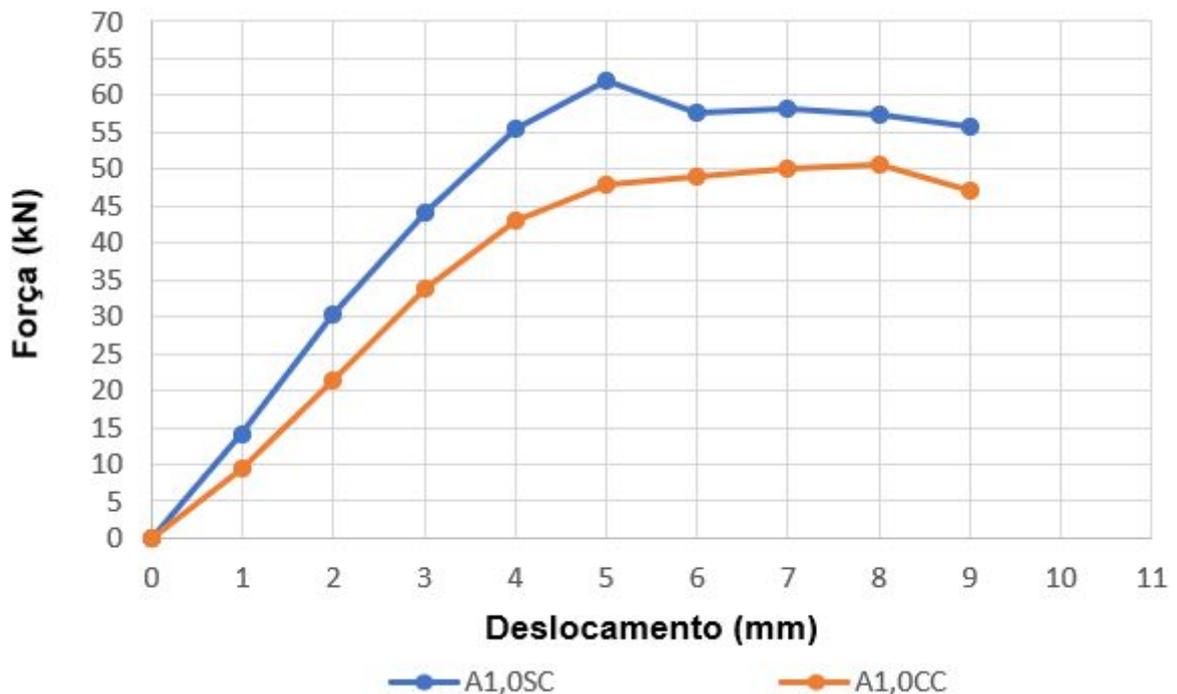


Fonte: Autor (2020)

No Gráfico 10, assim como no Gráfico 9, a viga com adição de 0,50% que não passou pelo processo de corrosão (A0,5SC) apresentou resistência superior se comparada a viga com adição de 0,50% que foi submetida ao processo de corrosão (A0,5CC). Porém, novamente, a viga com corrosão, apesar de apresentar resistência inferior (13,42%), suportou as solicitações por mais tempo, chegando a um deslocamento de 11 mm. Estes resultados podem estar ligados à característica de ductilidade das fibras. Essa característica não aumenta a resistência mecânica, porém, funciona evitando a fissuração, fazendo, assim, com que o concreto aguente por mais tempo a mesma carga. Ainda, essa característica pode estar associada ao processo de corrosão, o que garante a peça de concreto tenha uma maior vida útil, ou seja, que a viga suporte a carga excessiva por um período maior de tempo, diferentemente da viga sem corrosão onde, no momento que atinge seu pico de resistência mecânica sofre uma queda brusca e repentina de suporte das cargas aplicadas.

Amaral Júnior, *et al* (2017) em seus estudos chegaram à conclusão de que a adição de fibras aumenta a capacidade do concreto de absorver a carga aplicada antes da ruptura, fazendo com que o mesmo consiga suportar uma maior deformação (flecha) antes da ruptura.

Gráfico 11 - Resistência à tração na flexão - vigas com adição de 1,00% de PET



Fonte: Autor (2020)

No Gráfico 11 é possível observar que inicialmente as vigas com adição de 1,00% de fibras de PET sem o processo de corrosão (A1,0SC) e as vigas com adição de 1,00% de fibras de PET submetidas ao processo de corrosão (A1,0CC) apresentaram comportamento semelhante às demais vigas ensaiadas e aos gráficos apresentados anteriormente. Porém, ao se aproximarem do ponto máximo de resistência, as vigas A1,0SC e A1,0CC, diferentemente das vigas referência e com 0,50% de adição, apresentaram uma curva de perda de resistência semelhante, o que leva à conclusão que a adição de 1,00% de fibra de PET não é capaz de auxiliar no processo de corrosão, pois além de apresentar resistência inferior, na casa de 29,37%, ainda não é capaz de aumentar o deslocamento da viga.

4.3 Análise da fissuração

Juntamente com o ensaio de tração na flexão, realizou-se o mapeamento das fissuras nas vigas de concreto armado. Em todos os casos analisados as vigas romperam no terço médio do vão, significando uma ruptura por flexão. Em todas as vigas, considerando as que passaram pelo processo de corrosão e as que não foram submetidas ao mesmo processo, as fissuras foram semelhantes, apenas variando a espessura. As Figuras 32 a 37 apresentam a fissuração das vigas que não foram submetidas ao processo de corrosão e as que passaram pelo Método CAIM.

As vigas referência, sem adição de fibra de PET apresentaram um comportamento distinto entre as que passaram pelo ensaio de corrosão e a que não passou. Na viga referência RSC ocorreram fissuras de flexão e fissura de cisalhamento com espessuras médias e pequenas, enquanto na viga referência que sofreu o processo de corrosão RCC houve um aparecimento de fissuras ocasionadas por flexão com espessuras significativas. Este resultado pode estar associado à perda de seção das armaduras. A Figura 31 apresenta a viga que não passou pelo processo de corrosão e a Figura 32, a viga que passou pelo método CAIM.

Figura 31 - Fissuração viga RSC



Fonte: Autor (2020)

Figura 32 - Fissuração viga RCC



Fonte: Autor (2020)

Na Figura 33 é apresentada a viga com adição de 0,5% de fibra de PET que não passou pelo processo de corrosão. Já na Figura 34 pode ser observada a viga com adição de 0,5% de fibra de PET que foi submetida ao processo de corrosão, nota-se que a mesma desenvolveu fissuras com maior espessura se comparada com a viga A0,5SC.

Figura 33 - Fissuração viga A0,5SC



Fonte: Autor (2020)

Figura 34 - Fissuração viga A0,5CC



Fonte: Autor (2020)

Nas Figuras 35 e 36 são apresentadas as vigas com adição de 1,0% de fibra de PET. Na Figura 35 é apresentada a viga que não foi submetida ao processo de corrosão. Nela pode ser observado que aparecem fissuras por flexão e uma leve fissura ocasionada por cisalhamento, ao passo que, a Figura 36 refere-se a viga submetida ao processo de corrosão, onde é possível notar fissuras mais aparentes de cisalhamento e com maior espessura. Estes resultados podem ter sido ocasionados pela perda de seção dos estribos.

Figura 35 - Fissuração viga A1,0SC



Fonte: Autor (2020)

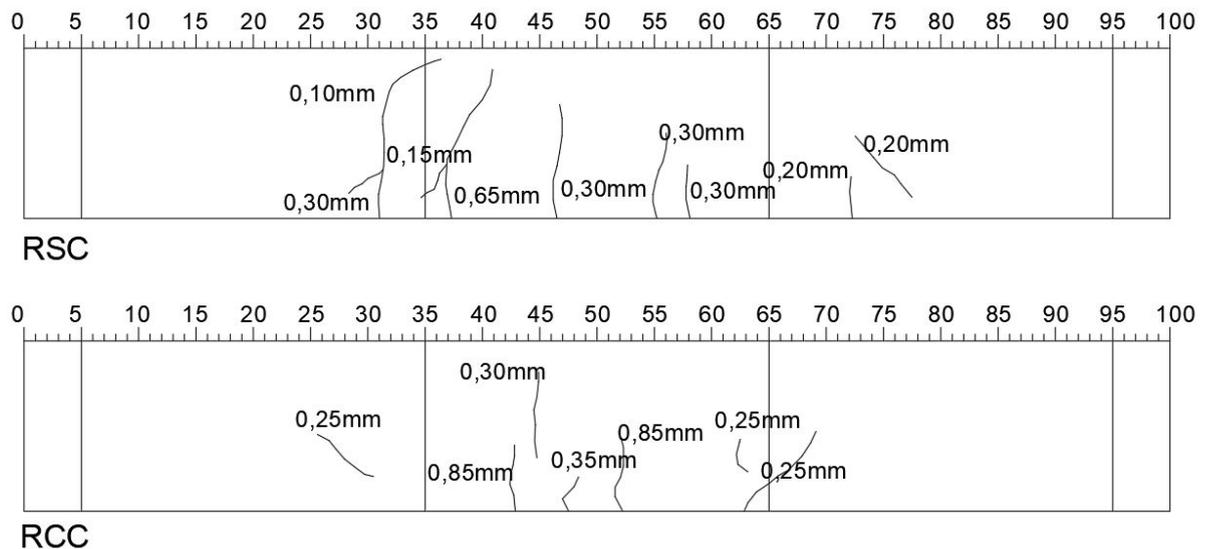
Figura 36 - Fissuração viga A1,0CC



Fonte: Autor (2020)

O mapeamento das fissuras, conforme a Figura 37, mostrou que, para as vigas referência, sem adição de fibra de PET (RSC e RCC) as que não foram submetidas ao processo de corrosão apresentaram fissuras ocasionados por flexão em sua grande maioria e pequenas fissuras ocasionadas por cisalhamento. As fissuras por flexão variaram de 0,10 mm até 0,65 mm enquanto as fissuras por cisalhamento apresentaram um valor de 0,20 mm de espessura. Já para a viga referência submetida ao processo de corrosão as fissuras ainda são ocasionadas por flexão e cisalhamento porém com maiores espessuras, variando de 0,25 mm até 0,85 mm. De acordo com os resultados obtidos para as vigas referência é possível observar que a corrosão, como esperado, é prejudicial às vigas de concreto armado, visto que estas quando submetidas ao processo de corrosão apresentaram fissuras mais espessas, que acredita-se, tenham sido ocasionadas pela perda de massa da seção das armaduras.

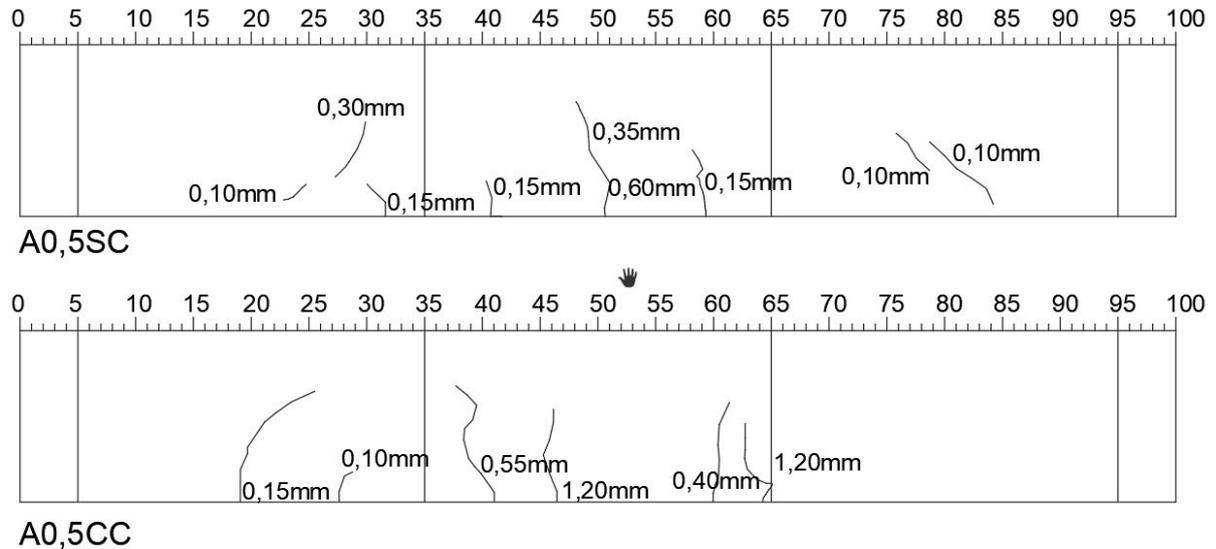
Figura 37 - Mapeamento da fissuração vigas RSC e RCC



Fonte: Autor (2020)

As vigas com adição de 0,50% de fibra de PET (A0,5SC e A0,5CC) que não foram submetidas ao processo de corrosão e as que passaram pelo método CAIM, Figura 38, apresentaram um rompimento ocasionado por flexão, sendo que, o que as difere são as espessuras geradas. Enquanto a viga A0,5SC apresentou espessuras entre 0,10 mm e 0,60mm a viga A0,5CC apresentou fissuras com variações de 0,10 até 1,20 mm. Como pode ser observado as fissuras dobraram de espessura. Este resultado pode ser devido a uma elevada perda de massa das armaduras, se comparado com a viga referência que obteve um aumento na casa de 41,17% na espessura das fissuras. Isto representa que a adição de 0,50% de fibra de PET não foi eficaz para minimizar o processo de corrosão nas armaduras.

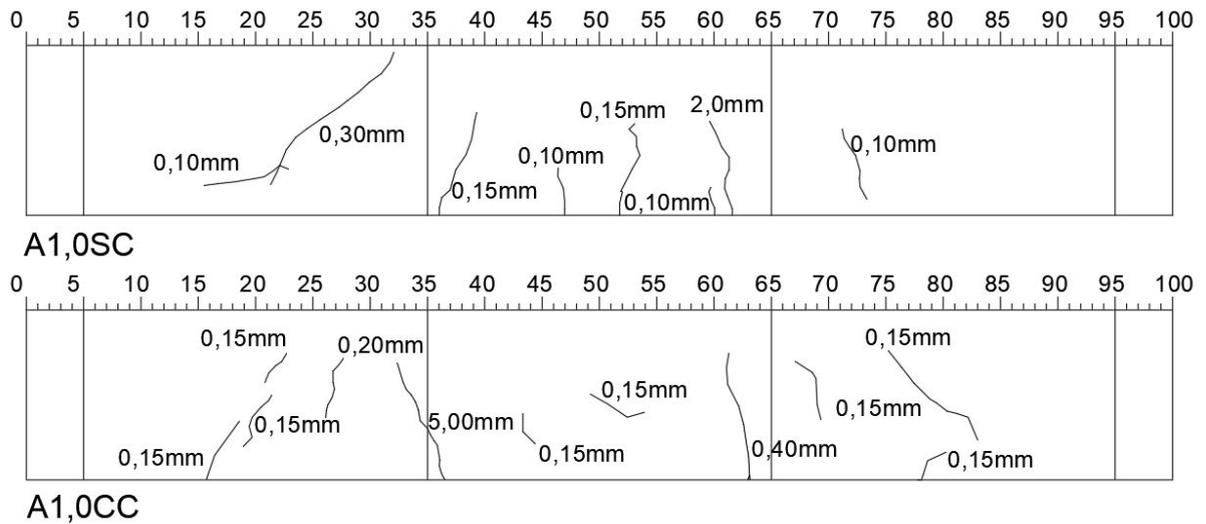
Figura 38 - Mapeamento da fissuração vigas A0,5SC e A0,5CC



Fonte: Autor (2020)

Conforme a Figura 39 as vigas com adição de 1,00% de fibra de PET (A1,0SC e A1,0CC), foram as que apresentaram os piores resultados. Em ambos os casos, nas vigas não submetidas e as vigas submetidas ao processo de corrosão, o rompimento foi ocasionado por cisalhamento. Na viga A1,0SC as fissuras apresentaram valores entre 0,10 mm e 2,0mm. Já a viga A1,0CC apresentou valores que variam de 0,15mm à 5,0 mm. Estes resultados representam basicamente que as armaduras dos estribos não suportaram as solicitações, e que possivelmente sofreram grande perda de seção pela corrosão. Se comparado com o traço referência a adição de 1,0% de fibra de PET resultou em um aumento na espessura das fissuras na casa de 525,00%, ou seja, representa que o aumento da quantidade de fibra de PET não foi eficaz no combate a corrosão das armaduras.

Figura 39 - Mapeamento da fissuração vigas A1,0SC e A1,0CC



Fonte: Autor (2020)

4.4 Perda de massa

Com base nas medições de diâmetro das barras da armadura positiva e dos estribos das vigas submetidas à corrosão acelerada por imersão modificada e posteriormente a tração na flexão, foi possível verificar uma diminuição do diâmetro das mesmas, o que confirma a perda de massa das barras de aço. Os resultados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Espessura das armaduras

Viga	ESPESSURA DAS ARMADURAS (ANTES E DEPOIS) DO MÉTODO CAIM					
	Espessura da armadura positiva (mm)			Espessura dos estribos (mm)		
	Lado direito	Centro	Lado Esquerdo	Lado direito	Centro	Lado Esquerdo
RSC	8,00	8,00	8,00	5,00	5,00	5,00
A0,5SC	8,00	8,00	8,00	5,00	5,00	5,00
A1,0SC	8,00	8,00	8,00	5,00	5,00	5,00
RCC	7,80	7,50	7,25	4,90	4,90	4,80
A0,5CC	7,70	7,45	7,30	4,80	4,50	4,50
A1,0CC	7,70	7,20	7,30	4,90	4,90	4,15

Fonte: Autor (2020)

Com os resultados é possível determinar que as barras de aço que mais sofreram com a ação da corrosão foram as armaduras das vigas com adição de 1,0% de fibra de PET, tanto nas armaduras positivas, quanto nas armaduras dos estribos, pois apresentaram uma redução de massa de até 0,70 mm nas armaduras positivas e 0,85 mm nos estribos. As armaduras que menos sofreram perda de massa foram as da viga referência, o que reforça a ideia de que a adição de fibra de PET nas dimensões e porcentagens do presente estudo não foram eficazes para o combate a corrosão.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o comportamento das vigas de concreto armado com adição de fibras de PET submetidas ao processo de corrosão acelerada por imersão modificada. Ainda serão apresentados sugestões para trabalhos futuros.

A caracterização física dos materiais incorporados à massa cimentícia (cimento, areia, brita, fibras de politereftalato de etila), mostrou conformidade com as normas vigentes, comprovando também a autenticidade dos dados disponibilizados pelos fornecedores de cada um destes materiais.

A adição das fibras de PET mostrou resultados não satisfatórios no que tange a resistência mecânica e deterioração das vigas de concreto armado. Diante do estudo percebeu-se que a resistência do concreto diminui conforme se aumenta a quantidade de fibra de PET na mistura cimentícia.

A adição das fibras de PET conferiu as vigas de concreto armado uma queda na resistência à tração na flexão. Porém para o traço com adição de 0,50% de fibra de PET, houve uma maior curva de deslocamento para a viga, fazendo com que ela suportasse por mais tempo o carregamento, diferentemente do traço com adição de 1,00% onde além de a viga apresentar uma queda na resistência à tração na flexão

ainda rompeu com um deslocamento inferior. Já para os ensaios à flexão dos corpos de prova, a adição teve comportamento neutro, ou seja, não apresentou ganhos na resistência, mas também não foi prejudicial.

Com o mapeamento das fissuras foi possível estabelecer que todas as vigas tiveram seu ponto de rompimento no terço médio do vão e que as que apresentaram fissuras com menor espessura foram as vigas sem adição de fibra de PET. Dentre as vigas com adição de fibras de PET, as que apresentaram melhores resultados foram as com adição de 0,50%. Todas as vigas que passaram pelo processo de corrosão tiveram uma fissuração acentuada, o que já era esperado, visto que as armaduras sofrem perda de massa em virtude da corrosão. A viga que apresentou o pior resultado foi a viga com adição de 1,00% de fibras de PET submetida ao processo de corrosão, que obteve fissuras na casa de 5,0 mm.

Desta forma, tem-se como conclusão geral que os ensaios executados ao longo deste trabalho mostraram que a adição de fibras de PET na matriz cimentícia não foi eficiente no combate à corrosão das armaduras. Porém, a porcentagem de adição de 0,50%, apesar de ter demonstrado resistência inferior ao traço referência, apresentou resultados satisfatórios no aumento da flecha, garantindo as vigas um maior tempo de vida útil antes do rompimento.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar a comparação de traços com adição de diferentes comprimentos de fibras para a porcentagem de adição de 0,50% de fibra de PET sob o volume do traço de concreto, visto que, esta porcentagem de adição foi a que apresentou melhores resultados. Assim é possível avaliar se o comprimento da fibra afeta a sua aderência e conseqüentemente aumenta os ganhos de resistência e proteção das armaduras.

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

_____. **NBR 15395: Garrafa soprada de PET para refrigerantes e águas – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 15588: Pré-forma de PET para sopro de embalagem para alimentos e bebidas – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2008.

ARAÚJO, Matheus Augusto Diógenes; COELHO, Daniela da Costa Leite. **ESTUDO COMPARATIVO A RESPEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) EM CONCRETOS PERMEÁVEIS NÃO ESTRUTURAIS.** 2019. 13 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2019

AMARAL JUNIOR, Josué Coelho do; SILVA, Luiza Caroline Ferreira; MORAVIA, Weber Guadagnin. **Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto.** Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro , v. 22, n. 1, e11780,2017 Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000100411&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 11 nov. 2020. Epub 02-Maio-2017. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0112>.

ARAÚJO, José Milton de. **CURSO DE CONCRETO ARMADO / José Milton de Araújo.** – Rio Grande: Dunas, 2010. v.1 , 3.ed.

ARMAZENAMENTO DAS GARRAFAS PET. São Paulo: Estadão, 08 maio 2008. Disponível em: <https://sustentabilidade.estadao.com.br/fotos/geral,armazenamento-das-garrafas-pet,306878>. Acesso em: 19 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET (ABIPET). **Nono censo da reciclagem de PET – Brasil O Ano 2012.** Disponível em <<http://abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Publicado em 2013. Acesso em 10.marc.2020.

BENTUR, A. MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** London. Elsevier. 1990. 448p.

BERTON, Júlia Giordani. **Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de materiais pozolânicos submetidas à corrosão**

acelerada. 2019. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2019.

BETIOLI, A.M. **Degradação de fibras de PET em materiais à base de Cimento Portland**. 140p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

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

CABRERA, Leonardo Sena. **VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À CORROSÃO ACELERADA: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE REPARO COM DIFERENTES MATERIAIS POZOLÂNICOS**. 2014. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

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

CENSO DA RECICLAGEM DO PET NO BRASIL 10ª EDIÇÃO. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria do Pet - Abipet, 01 nov. 2016.

COMIM, Kevin; ESTACECHEN, Tatiana. **Causas e alternativas de reparo da corrosão em armaduras para concreto armado**. Revista Construindo, Belo Horizonte, v. 9, Ed. Especial de Patologia, p. 36, jul. 2017.

CORÓ. A. G. **Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras pet**. Monografia. Departamento de Tecnologia da UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 64p. Ijuí. 2002.

FORMIGONI, A., CAMPOS, I. P. de A. **Reciclagem de PET Bottle-to-Bottle**. 1 st International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, Universidade Paulista, 2007.

FRADOS, J. **Plastic Engineering Handbook of the Society of the Plastic Industry, Inc**. Munchen: 4th Ed. Van Nostrand Reinhold Company, 1976. 909p

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996

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

GUIMARÃES, D. **Pisos industriais em concreto: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos**. 90 f. Diplomação

(Graduação em Engenharia Civil) –Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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

HELENE, P. R. do L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1986. 46 .

INSTITUTO DE DEFESA DO CONSUMIDOR (IDEC). **Onde jogar o lixo reciclável?** Revista on line. Disponível em < http://www.idec.org.br/uploads/revistas_materias/pdfs/2011-08-ed157-capareciclavel.pdf>, Publicado em agosto.2011. Acesso em 19.março.2020

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). Disponível em < <http://www.iupac.org/>>, acesso em 10.marc.2020.

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

MANO, E.B., MENDES, L.C., **Introdução a polímeros**, 2ª ed., Ed Edgard Blucher Ltda, (2001) pp118.

MARANGON, Ederli. **ASPECTOS DO COMPORTAMENTO E DA DEGRADAÇÃO DE MATRIZES DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND REFORÇADOS COM FIBRAS PROVENIENTES DA RECICLAGEM DE GARRAFA PET.** 2004. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.

MELO, J.W. de. **Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo.** 122p. Dissertação (Mestrado) – Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT. Universidade Estadual de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

MENESES, I. A. **Avaliação de concreto com adição de fibras de PET submetido à altas temperaturas.** 90p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Natal/RN. 2011.89f.

MODLER, L. E. et al. **Investigação das Propriedade Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras**. Em: V Congresso de Engenharia Civil. Juiz de Fora – MG. 2002.



UNIVATES

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