



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IGOR MACHADO DA SILVA PARENTE

**PARÂMETROS DE DURABILIDADE DE COMPÓSITO SISAL-CIMENTO PARA
USO COMO FÔRMAS PERMANENTES DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Salvador

2020

IGOR MACHADO DA SILVA PARENTE

**PARÂMETROS DE DURABILIDADE DE COMPÓSITO SISAL-CIMENTO PARA
USO COMO FÔRMAS PERMANENTES DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Co-orientador: Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro

Agência Financiadora: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB)

Salvador

2020

P228 Parente, Igor Machado da Silva.

Parâmetros de durabilidade de compósito sisal-cimento para uso como fôrmas permanentes de vigas de concreto armado/ Igor Machado da Silva Parente. – Salvador, 2020.

141 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2020.

1. Concreto armado. 2. Sisal (fibra). 3. Compósitos. 4. Fôrma permanente. 5. Durabilidade. I. Lima, Paulo Roberto Lopes. II. Ribeiro, Daniel Véras. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD.: 624.183



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA



ATA 05/20 DA SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos 18 dias do mês de agosto de 2020, às 08:30 horas, na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Professores Paulo Roberto Lopes Lima (Orientador do Candidato), Daniel Veras Ribeiro (Coorientador), Cleber Marcos Ribeiro Dias (Examinador Interno), Ricardo Fernandes Carvalho (Examinador Interno) e Saulo Rocha Ferreira (Examinador Externo) iniciou-se a Defesa de Dissertação de Mestrado do(a) candidato(a) **IGOR MACHADO DA SILVA PARENTE**, intitulada **“PARÂMETROS DE DURABILIDADE DE COMPÓSITO SISAL-CIMENTO PARA USO COMO FÔRMAS PERMANENTES DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO.”**

Concluída a apresentação, arguição e defesa oral da dissertação, conforme disposto no Regimento Interno do PPEC, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado o candidato:

APROVADO (Avaliação do Profº Paulo Roberto Lopes Lima)

APROVADO (Avaliação do Profº Daniel Veras Ribeiro);

APROVADO (Avaliação do Profº Cleber Marcos Ribeiro Dias);

APROVADO (Avaliação do Profº Ricardo Fernandes Carvalho);

APROVADO (Avaliação do Profº Saulo Rocha Ferreira).

Encerrada a sessão, foi lavrada a presente ata que vai acompanhada dos pareceres escritos de cada examinador e assinada pela Comissão Julgadora.

Salvador, 18 de Agosto de 2020.

A Comissão Julgadora:

Profº Drº Paulo Roberto Lopes Lima
(Orientador)

Profº Drº Daniel Veras Ribeiro
(Coorientador)

Profº. Drº Cleber Marcos Ribeiro Dias
(Examinador Interno)

Profº. Drº Ricardo Fernandes Carvalho
(Examinador Interno)

Profº. Drº Saulo Rocha Ferreira (Examinador Externo)

- NOTA REGIMENTAL:**
- ♦ Será considerado habilitado o candidato que obtiver aprovação da maioria dos examinadores.
 - ♦ A emissão dos pareceres finais dos examinadores poderão ser condicionados à efetivação de reformulações necessárias que não impliquem em alteração fundamental da dissertação. **O documento com as reformulações deverá ser entregue à Comissão Julgadora no prazo máximo de 60 (sessenta) dias sob pena de cancelamento da defesa.**
 - ♦ Em caso de excepcional qualidade ou originalidade, o trabalho poderá merecer a menção "aprovado com distinção", quando houver unanimidade da Comissão Julgadora.
 - ♦ "Este documento não tem valor oficial até a homologação da defesa pelos órgãos competentes"

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, a minha esposa, a minha irmã, aos meus familiares e amigos que de muitas maneiras me apoiaram durante essa etapa.

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos Espíritos de Luz os quais sempre me abençoaram e me protegeram.

Aos meus pais Gilvan e Marcia e a minha esposa, minha amiga e meu amor Elvira Maria por serem a bússola que me norteou durante essa etapa da minha carreira.

Aos meus tios, em especial: Lula, Lena e Adelson pelo apoio e pelos conselhos durante o mestrado.

A minha irmã Thais e ao meu cunhado Eduardo, as minhas afilhadas Luiza (sobrinha) e Isabelly, e meus sobrinhos Artur e Moreno por me proporcionarem momentos de descontração, ensinando-me que é preciso parar um pouco para se divertir.

A minha sogra e amiga Valdete, e a minha cunhada Nanci por todos os ensinamentos adquiridos com a doutrina espírita.

As minhas avós: Maria, Noelia, Arlinda e Hilda por torcerem por mim, mesmo à distância.

A todos os familiares que contribuíram no meu crescimento, pelo apoio e carinho.

Aos meus grandes amigos e amigas Hamilton, Priscila, Marcio, Caique, Mariana Penna, Larissa, Luisa, Emerson, Maria Cecília, Andrea, Bruno, João Paulo, Ikaro, Rafael, Bernardo, Leonardo, Mariana, Gabriel, Alexandre, Anna Luiza, Patrícia, Willian, Luciana, Carla, Antônio e Rangel.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima pela excelência profissional e humana, pelo suporte técnico e moral compartilhado, principalmente nos momentos mais difíceis e decisivos da pesquisa, e pela amizade.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro por ter me dado a primeira oportunidade de realizar pesquisa científica, a qual permitiu o ingresso nesta área.

Aos meus amigos e minhas amigas que o mestrado me proporcionou e que levarei comigo aonde eu for: Tatiana, Marianna, Dimas, Mércurie, Ruan, Adilson, Julyane, Igor Brumano, Cezar, Henrique, Fernanda, Leandro, Caroline, Vívica, Maria Luiza, Ana Cláudia, Laís, Caline, Catharine, Alana e Ana Lúcia pelos incentivos, momentos de muitas risadas, conselhos e conhecimentos compartilhados.

Aos colegas do LEDMa: Daniel Mota, Nilson, Silas, Tiago, Guilherme, Luciano, Raphael Mariano, Igor Moraes, João Paulo Paim, Thays, Matheus, Bruna Mariani, Maurício, Maurílio, Yago, Gabriel, Gabriela, André, Danilo, José, Raphael, Ellen, Gessivaldo, Gabriela, Mavisson, Vitor, Diana, João Paulo, Edigar, Mariana, Luiz Felipe, Thais e Bruna.

Aos colegas do PPGECEA (UEFS): Camila, Lidiane, Raphaela, Maurício, Gabriel, João Vitor, Itamara e Paulo Henrique.

Aos colegas do LAMETCorr: Gisele, Ana Luisa e Anésio.

Aos colegas do GEOAMB: Camila, Fernanda, Jeová, Bruno e José.

À equipe de funcionários do LEDMa, do CETA e do LABOTEC (UEFS): Paulo César, Rita, Elisama, Jorge, Myrella, Izabela, Adriano, Talita, Érica, Marta, Nilson, Cátia, Walner, Rosana e Simone.

Ao IFBA, em especial Carina, por realizar ensaios laboratoriais.

À MSC Engenharia, especialmente Alírio, por ter cedido alguns equipamentos para realização de ensaios durante a pesquisa.

Em especial às professoras Dra. Mônica Batista Leite, Dra. Maria do Socorro Costa São Mateus e Dra. Eduarda Cristina Pires Luso e aos professores Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva, Dr. Carlos César Uchôa de Lima, Me. Diógenes Oliveira Senna e Esp. Carlos Antônio Alves Queirós por todo apoio que me deram.

Aos professores e funcionários do PPEC pelo crescimento técnico e científico que me forneceram.

À banca examinadora, por contribuírem com seus conhecimentos e por avaliar este trabalho.

A todas as pessoas esquecidas.

A todos aqueles que torceram por mim e acreditaram, juntos comigo, que tudo daria certo.

À FAPESB pelo financiamento da bolsa durante o mestrado.

À Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia e à Universidade Estadual de Feira de Santana por possuir infraestrutura suficiente para realização dessa pesquisa.

FORMAÇÃO DO CANDIDATO

Engenheiro Civil, formado pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), 2013.

"Longe de ser um escudo eficaz, a ilusão de invulnerabilidade desencoraja a reação que teria fornecido uma proteção genuína. O desejo de nos expor nos transforma. Ele nos torna um pouco mais corajosos a cada vez."

Brené Brown

RESUMO

A construção civil é um dos setores com maior impacto sobre o meio ambiente, devido ao consumo de materiais naturais não-renováveis e a geração de resíduos. O uso de fôrmas de madeira tem se tornado um motivo de preocupação ambiental pela quantidade de material descartado durante a construção de estruturas de concreto armado. Fôrmas permanentes em compósitos com fibras de sisal têm sido utilizadas como alternativa às fôrmas de madeira, mas podem afetar a durabilidade do concreto armado se a permeabilidade for maior que a do revestimento tradicional. Nesse trabalho é investigado o efeito do teor de fibras sobre parâmetros de durabilidade de compósitos sisal-cimento, utilizados como fôrmas permanentes. Compósitos de matriz de argamassa com 2%, 4% e 6% de fibras, em massa, uma matriz de argamassa autoadensável e um concreto foram caracterizados. A avaliação das propriedades físicas dos compósitos demonstra a redução da absorção de água por imersão e a capilaridade do compósito reforçados com 2% de fibras, em comparação com a matriz e com os compósitos com 4% e 6% de fibras. Apesar da redução da resistência à compressão, a adição de fibras aumentou a tensão residual do compósito sob flexão. A resistividade elétrica dos compósitos reduziu cerca de 30%, em média, com a adição de fibras, o que torna o compósito com 6% de fibras mais suscetível à entrada de agentes agressivos do que os demais. Além disso, os compósitos com 2% de fibras apresentaram menor espessura de carbonatação que a matriz. Os resultados do ensaio de migração de cloretos indicam a mistura com 2% de fibras apresentou o menor coeficiente de difusão no estado não estacionário que a matriz e que todos os compósitos apresentaram uma resistência alta à penetração de cloretos.

Palavras-chave: Durabilidade. Fôrma permanente. Compósitos. Fibras de sisal. Concreto armado.

ABSTRACT

Civil construction is one of the sectors with the greatest impact on the environment, due to the consumption of non-renewable natural materials and the generation of waste. The use of wooden formworks has become a cause of environmental concern due to the amount of material discarded during the construction of reinforced concrete structures. Permanent sisal fibers composites formworks have been used as alternative from wooden ones, but durability of reinforced concrete can be affected if permeability is larger than traditional covering. In this work, the effect of fiber content on durability parameters of sisal-cement composites, used as permanent formworks is investigated. Mortar matrix composites with 2%, 4% and 6% fibers, in mass, a self-compacting mortar matrix and a concrete were characterized. The evaluation of the physical properties of the composites shows the reduction of water absorption by immersion and the capillarity of the composite with 2% of fibers, in comparison with a matrix, a concrete and the composites with 4% and 6% fibers. In despite of reduction in compressive strength, addition of fibers increased the residual stress of the composite under bending. Electrical resistivity of the composites reduced approximately 30%, on average, with the addition of fibers, which makes the composite with 6% fibers more susceptible than others at that entry aggressive agents. Besides that, the composites with 2% of fibers presented less carbonation thickness than the matrix. The results of the chloride migration test indicate a mixture with 2% of fibers showed the lowest diffusion coefficient in the non-stationary state than the matrix and that all composites showed a high resistance to chloride penetration.

Keywords: Durability. Permanent formwork. Composites. Sisal fibers. Reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostra de GFRC com barras de GFRP.	5
Figura 2 - Fôrma permanente para vigas em: (A) concreto simples; (B) concreto armado (medidas em mm).....	6
Figura 3 - Fôrmas permanentes, planas e em perfil "U", para: (A) lajes; (B) vigas (medidas em mm).....	7
Figura 4 - Projeto da fôrma: painéis reforçados em forma de U (1) e conectores (2).	7
Figura 5 - Compósito madeira-cimento para fundação de estruturas: (A) aplicação em obra e; (B) comparação entre o projeto e o executado na obra.....	8
Figura 6 - Fôrma permanente de argamassa armada (etapas de produção): (A) formato da malha de aço; (B) lançamento da argamassa; (C) moldagem e adensamento da argamassa; (D) fôrmas de argamassa armada em perfil "U".	9
Figura 7 - (A) Projeto da fôrma <i>SIP</i> e (B) viga rompida à flexão.....	10
Figura 8 - Exemplo de elemento de enchimento para lajes, feito em material compósito.	11
Figura 9 - Curvas carga/deslocamento do ensaio de flexão com carga centrada nos elementos de enchimento.	11
Figura 10 - (A) Viga de concreto armado e (B) fôrma permanente com fibras de sisal.	12
Figura 11 - Flexão de fôrmas permanentes com carga distribuída.....	12
Figura 12 - Representação da estrutura celular de uma fibra vegetal.	14
Figura 13 - Dimensões dos poros na pasta de cimento hidratada.....	18
Figura 14 - Dimensão dos poros associada aos poros capilares e capilares e os mecanismos de transporte.....	20
Figura 15 - Diagrama de <i>Pourbaix</i> simplificado para o sistema ferro-água a 25°C.	21
Figura 16 - Diagrama de <i>Pourbaix</i> simplificado para o sistema ferro-água com cloretos (355 ppm).....	22
Figura 17 - Esquema de montagem do aparato de migração de cloretos.	29
Figura 18 - Diagrama do programa experimental.	44

Figura 19 - Distribuição dos tamanhos de partícula do cimento, da sílica ativa e da cinza volante.....	46
Figura 20 - Distribuição dos tamanhos de partícula da areia e da brita.	48
Figura 21 - (A) Aquisição e separação das fibras em lotes, (B) lavagem das fibras em água a 50 °C e (C) exposição das fibras presas em suporte metálico. .	49
Figura 22 - (A) Imersão das fibras em água, (B) retirada de excesso de umidade e (C) secagem em estufa.....	50
Figura 23 - (A) Pente de pregos; (B) guilhotina; (C) fibra cortada com 40mm. ...	50
Figura 24 - Espalhamento <i>flow table</i> dos compósitos (A) F0, (B) F2, (C) F4 e (D) F6.	53
Figura 25 - Moldagem das misturas em quatro camadas sucessivas com 5cm de altura, cada.	54
Figura 26 - Execução do ensaio de absorção de água por imersão: determinação (A) da massa imersa e (B) da massa seca e saturada.	55
Figura 27 - (A) Equipamento de determinação da velocidade de onda ultrassônica Pundit Lab e (B) realização do ensaio.	59
Figura 28 - (A) Esquema de preparação do ensaio de fratura; (B) execução do ensaio de fratura.....	62
Figura 29 - Esquema de corte dos corpos de prova para o ensaio de carbonatação (medidas em mm).....	65
Figura 30 - Impermeabilização das laterais dos corpos de prova de concreto com parafina.....	66
Figura 31 - Sentido e direção da penetração de CO ₂	66
Figura 32 - Câmara de carbonatação QUIMIS utilizada na pesquisa.	67
Figura 33 - Definição da escala no <i>software ImageJ</i>	68
Figura 34 - Cálculo da área carbonatada.....	68
Figura 35 - Aparato de migração de cloretos.	70
Figura 36 - Obtenção de amostras para realização de ensaio de migração de cloretos (medidas em mm).	71
Figura 37 - Representação esquemática do procedimento de estimativa das fases do concreto, adaptada da norma ASTM E 562 (ASTM, 1999).....	72
Figura 38 - Condutividade elétrica em função da concentração de cloretos em solução.	72
Figura 39 - Curva padrão do ensaio de migração de cloretos.	73

Figura 40 - (A) Esquema de medição da resistividade elétrica do concreto, segundo o princípio de Wenner; (B) Execução do ensaio de resistividade elétrica com equipamento de bancada.	75
Figura 41 - Correlação entre os resultados de índices de vazios e velocidade de onda ultrassônica das misturas F2, F4 e F6.	80
Figura 42 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F0.	82
Figura 43 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F2.	82
Figura 44 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F4.	82
Figura 45 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F6.	83
Figura 46 - Correlação entre os resultados de índices de vazios e de absorção por capilaridade das misturas F2, F4 e F6.	84
Figura 47 - Correlação entre os resultados de índices de vazios e compressão axial das misturas F2, F4 e F6.	86
Figura 48 - Diagrama de carga até 0,05 mm de abertura de fissura em F0, F2, F4 e F6.	88
Figura 49 - Diagrama de carga em função da abertura de fissura em F2, F4 e F6.	88
Figura 50 - Absorção capilar de água em corpos de prova do concreto de cobertura, em função da raiz quadrada do tempo.	92
Figura 51 - Profundidade carbonatada das misturas por (A) 56 dias, (B) 63 dias e (C) 70 dias.	94
Figura 52 - Profundidade de carbonatação do concreto de cobertura após exposição acelerada durante (A) 56, (B) 63 e (C) 70 dias.	95
Figura 53 - Profundidades de carbonatadas de F0, F2, F4, F6 e CC aos 56, 63, 70 dias de exposição.	97
Figura 54 - Evolução da profundidade de carbonatação das amostras F0, F2, F4, F6 e CC em função do tempo e identificação do coeficiente de carbonatação.	99
Figura 55 - Espessura carbonatada em função da raiz do tempo de exposição.	100

Figura 56 - Evolução da concentração de cloretos na célula anódica em relação ao tempo para F0, F2, F4, F6 e CC (Δ = início do estado estacionário e \bullet = final do estado estacionário). 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cobrimento nominal das armaduras, em função das classes de agressividade, de acordo com a NBR 6118:2014.....	22
Tabela 2 - Classificação do concreto quanto à resistência à penetração de cloreto de acordo com os limites propostos por Nilsson <i>et al. apud</i> GjØrv (2015)...	29
Tabela 3 - Valores de resistividade elétrica do concreto e sua relação com o risco de ocorrência da corrosão, conforme normatização internacional.....	31
Tabela 4 - Relação entre resistividade elétrica superficial e penetração de cloretos (AASHTO TP 95-14).....	31
Tabela 5 - Características físicas do cimento, sílica ativa, cinza volante.....	46
Tabela 6 - Composição química principal do cimento, sílica ativa, cinza volante.	47
Tabela 7 - Características físicas da areia e da brita.....	48
Tabela 8 - Características físicas da fibra de sisal.....	51
Tabela 9 - Traços unitários para as misturas F0, F2, F4 e F6.	52
Tabela 10 - Consumos de materiais, por m ³ , para as misturas F0, F2, F4 e F6.	52
Tabela 11 - Etapas e os tempos de mistura para produção dos compósitos.....	54
Tabela 12 - Critérios de avaliação do concreto com base na velocidade de onda ultrassônica, segundo BS (2004).....	58
Tabela 13 - Classificação do compósito reforçado com fibras para fins estruturais com base nas tensões residuais, conforme CEB-FIP (2011).	63
Tabela 14 - Traço unitário e consumos das matérias-primas do concreto, por m ³	64
Tabela 15 - Etapas e os tempos de mistura para produção do concreto.....	64
Tabela 16 - Valores médios obtidos do ensaio de absorção de água por imersão das misturas F0, F2, F4 e F6.....	77
Tabela 17 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica das misturas F0, F2, F4 e F6.	79
Tabela 18 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das misturas F0, F2, F4 e F6.....	81
Tabela 19 - Resistência à compressão axial, módulo de elasticidade estático e dinâmico das misturas F0, F2, F4 e F6.	84

Tabela 20 - Limite de proporcionalidade ($f_{fct,L}$), tensões equivalentes ($f_{eq,i}$) e residuais ($f_{R,i}$) para as misturas F0, F2, F4 e F6.	91
Tabela 21 - Resultados de absorção de água por imersão do concreto de cobrimento.	92
Tabela 22 - Área carbonatada das amostras F0, F2, F4, F6 e CC em função do tempo de exposição.	96
Tabela 23 - Classificação das amostras F0, F2, F4, F6 e CC quanto à resistência à penetração de cloreto de acordo com os limites estabelecidos por Nilsson <i>et al. apud</i> Gjorv (2015).	103
Tabela 24 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica e classificação das misturas F0, F2, F4 e F6.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Agl/a	Aglomerante/areia
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials Standards</i>
BET	Brunauer, Emmett e Teller - Ensaio para determinação de área superficial específica
C	Absorção de água por capilaridade
D _s	Coeficiente de difusão no estado estacionário
D _{ns}	Coeficiente de difusão no estado não-estacionário
D ₅₀	Diâmetro mediano de partícula
E _e	Módulo de elasticidade estático
E _d	Módulo de elasticidade dinâmico
EPS	Poliestireno expandido
f _c	Limite de resistência à compressão axial
FRX	Fluorescência de raios X
F2	Compósito com 2% de fibras de sisal
F4	Compósito com 4% de fibras de sisal
F6	Compósito com 6% de fibras de sisal
CMOD	<i>Crack Mouth Opening Displacement</i> (deslocamento da abertura de fissura)
GFRP	Polímero reforçado com fibra de vidro
i	Índice de absorção de água por capilaridade
I _v	Índice de vazios ou Porosidade aparente
J _{Cl}	Fluxo de íons cloro
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i> (transformador diferencial variável linear)
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NT	<i>Nordtest</i> (teste nórdico)
PC	Penetração de cloretos
PDCC	Compósito cimentício pseudo-dúcteis
PET	Polietileno tereftalato

pH	Potencial hidrogeniônico
PP	Polipropileno
PVA	Poliacetato de vinila
S_c	Coefficiente de absorção capilar
<i>SIP</i>	<i>Stay-In-Place</i>
S1	Parede secundária 1
S2	Parede secundária 2
S3	Parede secundária 3
U	Teor de umidade
UHTCC	Compósito cimentício de ultra alta resistência
V	Velocidade de onda ultrassônica
VMA	<i>Viscosity Modifying Agent</i> (agente modificador de viscosidade)
VUP	Vida útil de projeto
x	Profundidade de carbonatação
w/c	Água/cimento
w/agl	Água/aglomerante
ρ	Densidade ou Massa específica
ρ_e	Resistividade elétrica
τ	<i>Time lag</i>

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA	Erro! Indicador não definido.
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
SUMÁRIO	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 FÔRMAS PERMANENTES.....	5
2.2 FIBRAS DE SISAL EM MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	13
2.3 DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO	17
2.3.1 Estruturas dos poros e mecanismos de transporte	17
2.3.2 Importância do cobrimento das armaduras	20
2.3.3 Carbonatação.....	23
2.3.4 Corrosão por ação dos cloretos.....	26
2.4 DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	32
2.4.1 Absorção de água	32
2.4.2 Propagação de ondas ultrassônicas.....	36
2.4.3 Carbonatação.....	38
2.4.4 Migração de cloretos	39
2.4.5 Resistividade elétrica.....	42
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	44
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	45
3.1.1 Aglomerantes	45
3.1.2 Agregados	47
3.1.3 Fibras de sisal	48
3.1.4 Aditivos químicos.....	51
3.1.5 Água.....	51
3.2 COMPÓSITO SISAL-CIMENTO	52
3.2.1 Dosagem e moldagem	52
3.2.2 Caracterização física no estado endurecido.....	55

3.2.3	Caracterização mecânica no estado endurecido.....	59
3.3	CONCRETO DE COBRIMENTO	63
3.3.1	Dosagem e moldagem	63
3.3.2	Caracterização física no estado endurecido.....	64
3.4	ANÁLISE DA DURABILIDADE.....	65
3.4.1	Carbonatação.....	65
3.4.2	Migração de cloretos	70
3.4.3	Resistividade elétrica.....	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DO COMPÓSITO SISAL-CIMENTO	77
4.1.1	Absorção de água por imersão	77
4.1.2	Propagação de ondas ultrassônicas.....	79
4.1.3	Absorção de água por capilaridade	80
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPÓSITO SISAL-CIMENTO.....	84
4.3	CONCRETO DE COBRIMENTO	91
4.4	ANÁLISE DE DURABILIDADE.....	93
4.4.1	Carbonatação.....	93
4.4.2	Migração de cloretos	101
4.4.3	Resistividade elétrica.....	104
5	CONCLUSÃO	107
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
7	REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

A utilização de vigas, lajes e pilares pré-fabricados tende a tornar a execução das estruturas mais rápida, econômica e com maior controle de qualidade, devido à simplificação de passos, partes e etapas construtivas, o que resulta em economia de mão de obra e de materiais, sendo essa considerada uma alternativa para melhorar a gestão nos canteiros de obras (KOSKELA, 1992; ALBUQUERQUE; EL DEBS, 2005). Outro ponto que tem sido considerado importante para a melhoria da gestão nos canteiros é a sustentabilidade, uma vez que reduz a quantidade de resíduos sólidos e o impacto ambiental como por exemplo, o descarte de fôrmas de madeira, utilizadas para moldagem do concreto fresco.

Considerando a perspectiva da sustentabilidade aliada à melhoria da gestão, vem sendo crescente os estudos sobre as fôrmas permanentes à base de materiais cimentícios, para serem utilizadas em estruturas de concreto armado (ABREU, 2014; HUANG *et al.*, 2017; KANG; HONG; KWON, 2017).

As fôrmas permanentes surgem como uma alternativa de substituir as outras já existentes: as descartáveis (de madeira) e as reutilizáveis (metálicas). As fôrmas que utilizam madeira serrada, tábuas e compensados (NAZAR, 2007), estão sendo cada vez mais controladas e regulamentadas pela legislação ambiental, tanto na aquisição quanto no descarte (LIMA; CRUZ; SILVA, 2016). Já as fôrmas com perfis e chapas de aço ou alumínio (NAZAR, 2007) podem ter alto consumo energético durante o processo de fabricação (SANTOS, 2019), além de serem suscetíveis à corrosão.

Entretanto, apesar dos benefícios já citados, essas fôrmas permanentes de argamassa armada estão suscetíveis a agentes agressivos que provocam a corrosão da malha metálica que funciona como reforço dela própria (PARAMASIVAM *et al.*, 2019). Isso ocorre porque a entrada de agentes deletérios é facilitada devido a espessura de revestimento que esse tipo de fôrma possui, sendo cerca de 25 mm (FAHMY *et al.*, 2014), portanto, inferior ao valor mínimo estabelecido para estruturas submetidas a ambientes agressivos (ABNT, 2014). Considerando que um dos principais problemas de durabilidade das estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras, é fundamental que se encontre também maneiras de minimizar essa corrosão nas fôrmas permanentes.

Existem outros tipos de fôrmas permanentes, fabricadas em compósitos reforçados com fibras de sisal, que já vêm sendo estudados, tais como: os elementos de enchimento para lajes de concreto armado, os quais demonstraram potencialidade para essa aplicação (ROQUE, 2015; LIMA *et al.*, 2018) e as fôrmas para vigas de concreto armado (LEITE, 2019). As fibras de sisal comumente utilizadas, pois possuem baixo custo, baixo consumo energético de produção e são sustentáveis (FARUK *et al.*, 2012; KUMAR *et al.*, 2017). Desse modo, minimizam o impacto ambiental da construção civil, colaborando assim para a sustentabilidade (SANTOS; FONTES; LIMA, 2017).

No entanto, apesar das potencialidades listadas há de se considerar que esses compósitos com fibras vegetais também podem reduzir a durabilidade das estruturas, se a espessura da fôrma permanente e absorção de água pelas fibras, não forem consideradas durante a sua produção (FERREIRA *et al.*, 2012; SANTOS; LIMA, 2013). Isso porque, as fibras, dentro de uma matriz cimentícia, podem funcionar como condutores de água, aumentando a permeabilidade e a porosidade, fazendo com que o material absorva mais água (PRIYA; THIRUMALINI, 2018), uma vez que a sua natureza é hidrofílica (LIMA *et al.*, 2018). Assim, quanto maior for o percentual adicionado de fibras nessas matrizes, maior será a absorção de água e, conseqüentemente, a entrada de agentes agressivos (RAHMANI *et al.*, 2011). Com isso, o concreto reforçado com fibras pode se tornar mais suscetível a danos quando exposto ao ambiente.

Em se tratando de densidade, porosidade e deformabilidade de compósitos cimentícios com fibras vegetais, é relevante avaliar a homogeneidade desses por meio da propagação de ondas ultrassônicas. Em relação esses compósitos, há uma tendência em reduzirem os valores da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, à medida que aumenta o teor de fibras, devido, principalmente, ao aumento da porosidade (GONÇALVES, 2016; CARRARO, 2018).

A partir das discussões realizadas até aqui, é possível afirmar que há um consenso entre os autores sobre a relação de aumento da absorção de água pelas fibras, elevação da porosidade do compósito e redução da velocidade de ondas ultrassônicas. Por conseqüência o aumento da porosidade no compósito influencia em alguns parâmetros de durabilidade desse material, tais como: a resistividade elétrica, a profundidade de carbonatação e a penetração de cloretos. Na literatura, há

consenso sobre a redução da resistividade elétrica, em função do aumento da porosidade, entretanto nos demais parâmetros é possível observar que as pesquisas divergem entre si.

Os trabalhos como os de Fiala *et al.* (2016) e Song *et al.* (2018) discorrem sobre a resistividade elétrica em compósitos de matriz cimentícia reforçada com fibras sintéticas e convergem para a redução desta propriedade à medida que é elevado o teor de fibras, devido a esses tipos de fibras serem de natureza hidrofóbica. Entretanto, não foram encontrados trabalhos que avaliam a resistividade elétrica quando se utilizam fibras vegetais em compósitos cimentícios, sendo essa uma lacuna que este trabalho visa preencher.

Alguns estudos sobre o efeito da incorporação de fibras vegetais no compósito têm demonstrado que a presença das mesmas aumenta a profundidade de carbonatação do concreto (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013; PIZZOL *et al.*, 2014). Isso ocorre, pois aumenta a permeabilidade das amostras pela capacidade de absorção de água pelas fibras, já que estas têm uma estrutura celular porosa, o que aumenta a probabilidade de conexão entre os poros (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013; PIZZOL *et al.*, 2014). No entanto, existem outras pesquisas afirmam que a profundidade carbonatada pode diminuir, com a utilização de fibras sintéticas, já que estas são hidrofóbicas, e com a presença de materiais pozolânicos a fim de contribuir para o refinamento dos poros (VASANELLI *et al.*, 2013; ZHANG; LI, 2013).

No que diz respeito à penetração de íons cloro em concretos reforçados com fibras quando comparados com o concreto convencional, as pesquisas encontradas apresentaram conclusões também divergentes, uma vez que o tipo de fibras e a presença de adições pozolânicas influenciam na durabilidade do compósito. Em algumas pesquisas realizadas com fibras vegetais, os concretos com fibras apresentaram maior difusão de cloretos conforme o aumento do percentual de fibras (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013). No entanto, Kumar *et al.* (2017) observaram redução na difusão desses íons em função do aumento do teor de fibras.

Além das pesquisas relacionadas à resistividade elétrica, à penetração de cloretos e à carbonatação, outras fontes trazem técnicas que podem ser empregadas para aumentar a durabilidade desses compósitos a partir da substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos e do beneficiamento da fibra de sisal (LIMA, 2004; TOLEDO FILHO *et al.*, 2009; FERREIRA *et al.*, 2012; ROQUE, 2015; SILVEIRA, 2018).

A presente pesquisa, por sua vez, contribui para a ampliação das discussões acerca da influência das fibras vegetais em compósitos cimentícios expostos a ambientes agressivos, isto é, com altas concentrações de dióxido de carbono e de cloretos. Desse modo, a investigação dos fenômenos que influenciam na durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal é o cerne deste estudo.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do teor de fibras sobre parâmetros de durabilidade de compósitos sisal-cimento, já utilizados na produção de fôrmas permanentes. Avaliou-se a influência de fibras curtas de sisal nos teores de 2%, 4% e 6% sobre as propriedades físicas e mecânicas e sobre os parâmetros de durabilidade de compósitos sisal-cimento. Com isso, busca-se verificar se o compósito sisal-cimento utilizado como fôrma permanente apresentará uma proteção similar ao cobrimento de concreto de uma viga de concreto armado convencional, sem fôrma permanente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FÔRMAS PERMANENTES

De acordo com Nazar (2007) e Abreu (2014), existem três categorias de fôrmas para estruturas de concreto armado, são elas: i) provisórias e reutilizáveis, ii) descartáveis (comumente utilizadas na construção civil) e iii) permanentes. Estas últimas se destacam por serem peças pré-moldadas que dispensam a etapa de desforma, pois ficam no local que serão utilizadas, podendo ser ou não parte da estrutura o que contribui para acelerar a produção de vigas de concreto armado (ACI, 2004).

O sistema tradicional de fôrmas provisórias e escoramentos, usado na construção de estruturas de concreto armado, foi projetado para resistir tanto às cargas permanentes e variáveis, quanto às condições ambientais, até que o concreto desenvolva resistência suficiente para tornar a estrutura segura e durável (LI *et al.*, 2019). Entretanto, alguns pesquisadores sugerem a utilização de sistemas de fôrmas permanentes nessas estruturas, que também podem manter as condições de segurança do sistema tradicional (KIM, PILAKOUTAS, WALDRON, 2008; LEUNG, CAO, 2010; YU, 2014; HUANG *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2019).

Kim, Pilakoutas e Waldron (2008) desenvolveram elementos estruturais que são utilizados como fôrmas permanentes na construção de lajes, pisos de concreto moldados *in loco* ou de pontes. Essas fôrmas foram produzidas com GFRC (Concreto Reforçado com Fibra de Vidro) e, para evitar problemas de durabilidade, foi usada a barra de GFRP (Polímero Reforçado com Fibras de Vidro) pelos autores, além de terem uma espessura de cobrimento de 25 mm e 3 m de comprimento (Figura 1).

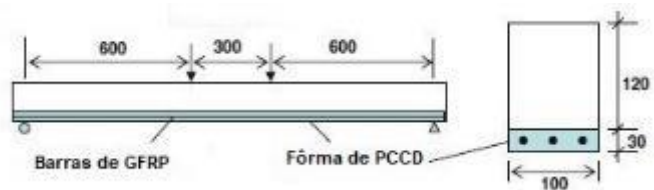
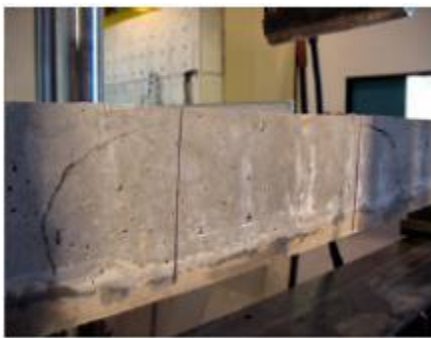
Figura 1 - Amostra de GFRC com barras de GFRP.



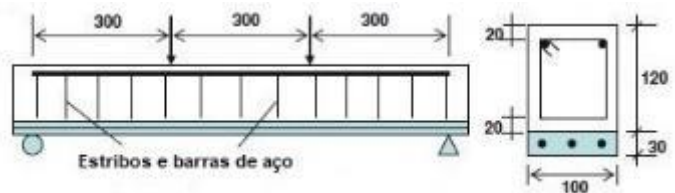
Fonte: (KIM, PILAKOUTAS, WALDRON, 2008).

Leung e Cao (2010) propuseram o uso de fôrmas permanentes para vigas, com 1,60 m e 1,00 m de comprimento, respectivamente, em: estruturas de concreto simples (Figura 2A) e armado (Figura 2B), usando compósitos cimentícios pseudo-dúcteis (PDCC) reforçados com barras de GFRP. Esse tipo de sistema proposto funciona como cobertura das armaduras a fim de evitar a corrosão delas, o que pode aumentar a durabilidade de vigas de concreto armado (LEUNG, CAO, 2010).

Figura 2 - Fôrma permanente para vigas em: (A) concreto simples; (B) concreto armado (medidas em mm).



(A)

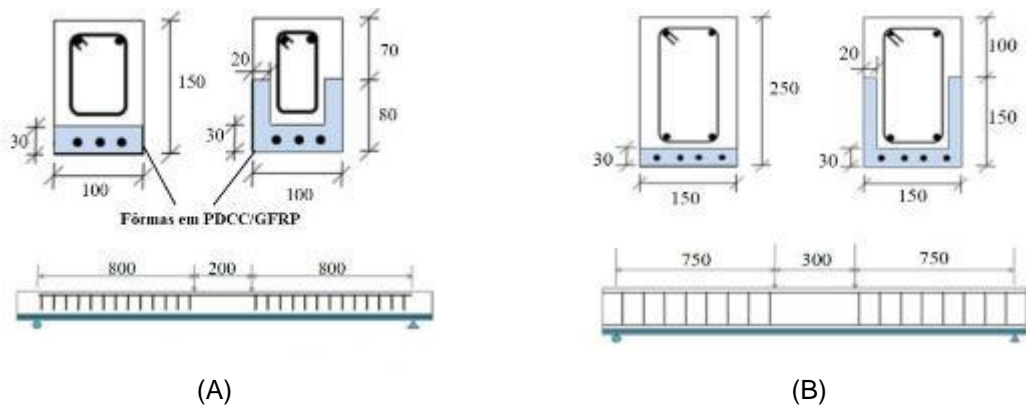


(B)

Fonte: (LEUNG; CAO, 2010).

Yu (2014) trouxe outra alternativa para a construção de elementos de concreto duráveis com o uso de fôrmas permanentes em perfil "U", para lajes (Figura 3A) e vigas (Figura 3B), ambas com 2 m de comprimento. Para a fabricação dessas fôrmas, o pesquisador utilizou PDCC, com a adição de fibras de poli (vinil álcool) (PVA), o que contribuiu para o controle de fissuras, dificultando a entrada de agentes agressivos. Além disso, o GFRP foi incorporado na fôrma para atuar tanto na resistência à flexão, quanto para aumentar a durabilidade (YU, 2014).

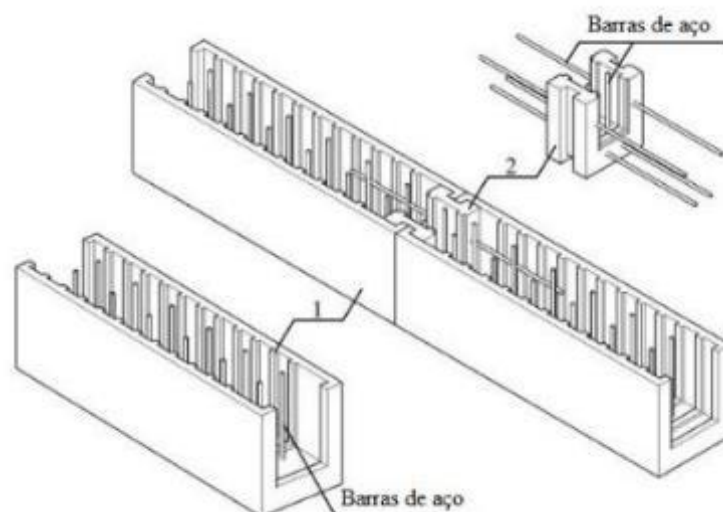
Figura 3 - Fôrmas permanentes, planas e em perfil "U", para: (A) lajes; (B) vigas (medidas em mm).



Fonte: (YU, 2014).

Huang *et al.* (2017) desenvolveram uma fôrma permanente, autoportante, em compósito cimentício de ultra alta resistência (UHTCC) reforçado com fibras de PVA, capaz de contribuir para a capacidade de carga das vigas ao longo de sua vida útil (Figura 4). Esse elemento construtivo pode melhorar eficiência da construção, além de ser empregado como camada protetora (espessura de 5 cm) para estruturas de concreto armado, resistindo à penetração de agentes deletérios (HUANG *et al.*, 2017).

Figura 4 - Projeto da fôrma: painéis reforçados em forma de U (1) e conectores (2).



Fonte: (HUANG *et al.*, 2017).

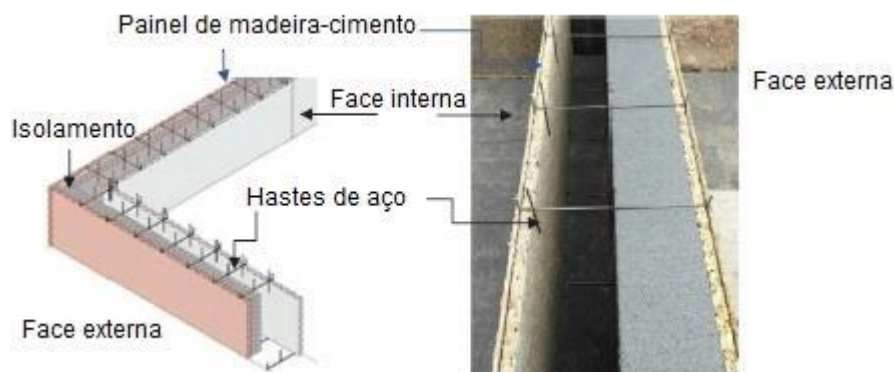
Li *et al.* (2019) investigaram o uso de painéis compostos de madeira-cimento como fôrmas permanentes, para elementos de fundação de algumas estruturas

(Figura 5A). As dimensões foram: 50 cm de altura, 2 m de comprimento e apresentam três espessuras diferentes de 25, 35 e 50 mm, de acordo com a Figura 5B. Essas dimensões dos painéis foram projetadas com o intuito de facilitar o transporte e o manuseio pelos trabalhadores da construção civil (LI *et al.*, 2019).

Figura 5 - Compósito madeira-cimento para fundação de estruturas: (A) aplicação em obra e; (B) comparação entre o projeto e o executado na obra.



(A)



(B)

Fonte: (LI *et al.*, 2019).

Segundo Abreu (2014), outros elementos pré-moldados em perfil “U”, fabricados com metal, concreto, polímeros, fibras etc. podem funcionar como cobertura de vigas, formando uma seção composta com esse tipo de perfil. Dentro desse contexto, existem as fôrmas produzidas com argamassa armada (Figura 6), que têm permitido a fabricação de vigas com características superiores quanto ao controle de fissuração, resistência ao impacto e tenacidade, especialmente devido ao espaçamento uniforme e do reforço dentro do material (FAHMY *et al.*, 2005). Além disso, essas fôrmas podem

ser utilizadas como camada de cobertura na construção de vigas em concreto armado (TAWAB; FAHMY; SHAHEEN, 2012).

Figura 6 - Fôrma permanente de argamassa armada (etapas de produção): (A) formato da malha de aço; (B) lançamento da argamassa; (C) moldagem e adensamento da argamassa; (D) fôrmas de argamassa armada em perfil “U”.



(A)



(B)



(C)



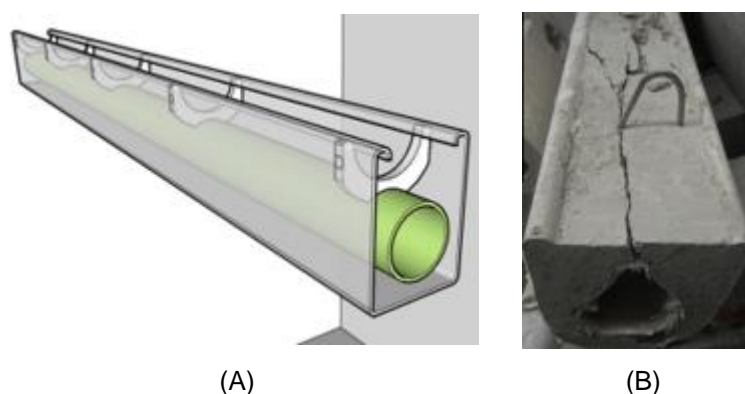
(D)

Fonte: (FAHMY *et al.*, 2005).

Além disso, alguns autores analisaram a aderência entre a fôrma permanente e o núcleo de concreto, e verificaram que não houve delaminação entre estes componentes (LEUNG; CAO, 2010, KANG; HONG; KWON, 2017; HUANG *et al.*, 2017). Fahmy *et al.* (2014) introduziram pontes de aderência e conectores de cisalhamento entre as fôrmas do tipo “U” e o núcleo de concreto e verificaram, por meio do ensaio de flexão em três pontos, que as fôrmas podem ser usadas como uma alternativa viável para vigas de concreto armado.

Outros autores como, De Sutter *et al.* (2014), desenvolveram uma fôrma *Stay-In-Place (SIP)* a partir de compósitos cimentícios reforçados com fibras têxteis de alto desempenho e de carbono, para vigas, pois, são materiais leves, fáceis de colocar na estrutura e dispensam armaduras, de acordo com a Figura 7. Esses autores mostram que há viabilidade e potencial de uso das formas estruturais desses compósitos cimentícios com elementos de núcleo oco para aplicações estruturais.

Figura 7 - (A) Projeto da fôrma *SIP* e (B) viga rompida à flexão.

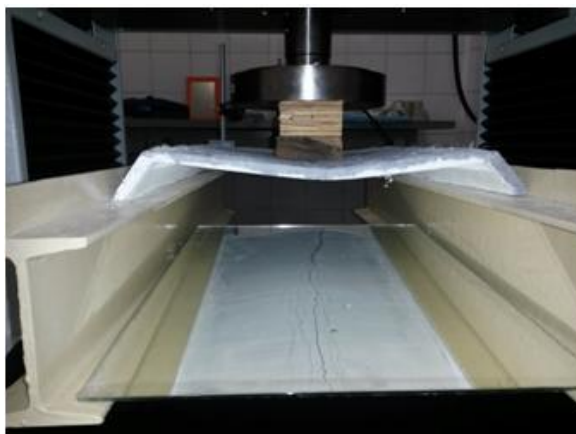


Fonte: (DE SUTTER *et al.*, 2014).

Além dos compósitos de argamassa armada, de madeira-cimento e dos reforçados com fibras sintéticas, já vem sendo desenvolvidos materiais cimentícios reforçados com fibras vegetais como, por exemplo, as fibras curtas de sisal. Segundo Lima *et al.* (2018) é possível utilizar elementos de enchimento para lajes reforçados com fibra de sisal, em substituição aos blocos cerâmicos e de poliestireno expandido (EPS), conforme mostra a Figura 8.

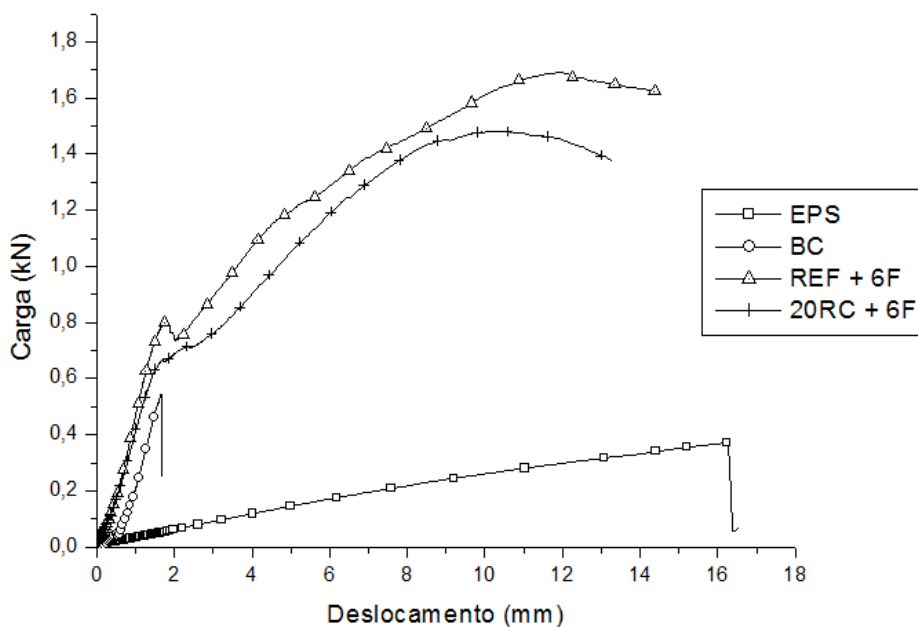
Conforme a Figura 9A, é possível visualizar a caracterização mecânica do elemento de enchimento feito com fibras de sisal (REF + 6F e 20RC + 6F), em que foi verificado maior desempenho desse elemento, nos quesitos de resistência à carga concentrada e à flexão, quando comparado aos blocos cerâmicos (BC) e de EPS, que são comumente empregados na construção de lajes pré-moldadas (ROQUE, 2015), o que demonstra a grande potencialidade de utilização deste material. A avaliação de lajes produzidas com este bloco demonstrou que não há alteração do comportamento mecânico da estrutura, em comparação com as soluções tradicionais (LIMA *et al.*, 2018).

Figura 8 - Exemplo de elemento de enchimento para lajes, feito em material compósito.



Fonte: (LIMA *et al.*, 2018).

Figura 9 - Curvas carga/deslocamento do ensaio de flexão com carga centrada nos elementos de enchimento.

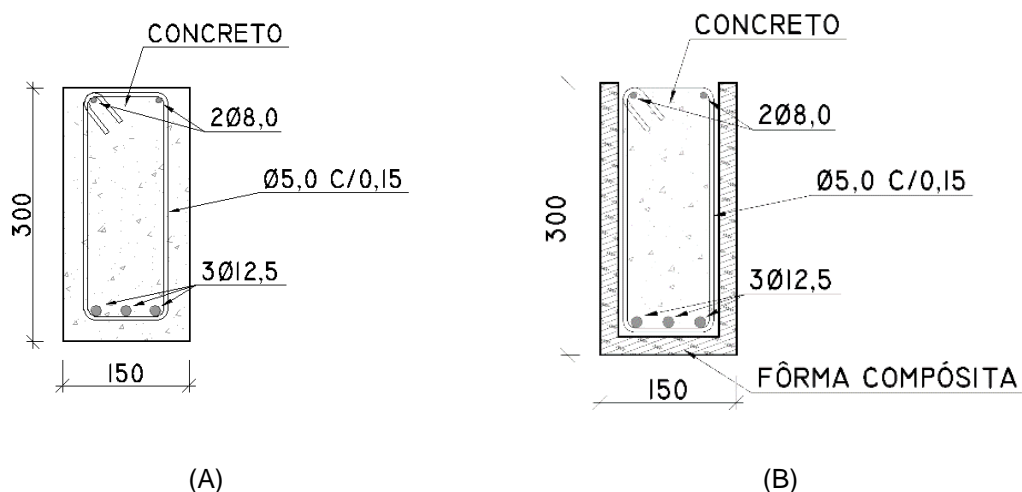


Fonte: (ROQUE, 2015).

Diante desses estudos com fibras vegetais, Leite (2019) produziu fôrmas permanentes com compósito reforçado com 4% e 6% de fibras curtas de sisal (40 mm), reduzindo as dimensões de uma viga de concreto armado (Figura 10A). Essas fôrmas compósitas possuíam 2,20 m de comprimento e espessura de cobertura igual a 20 mm, além de serem autoportantes, segundo a Figura 10B. Isso significa que é possível dispensar, também, acessórios de estruturação e nivelamento, e o

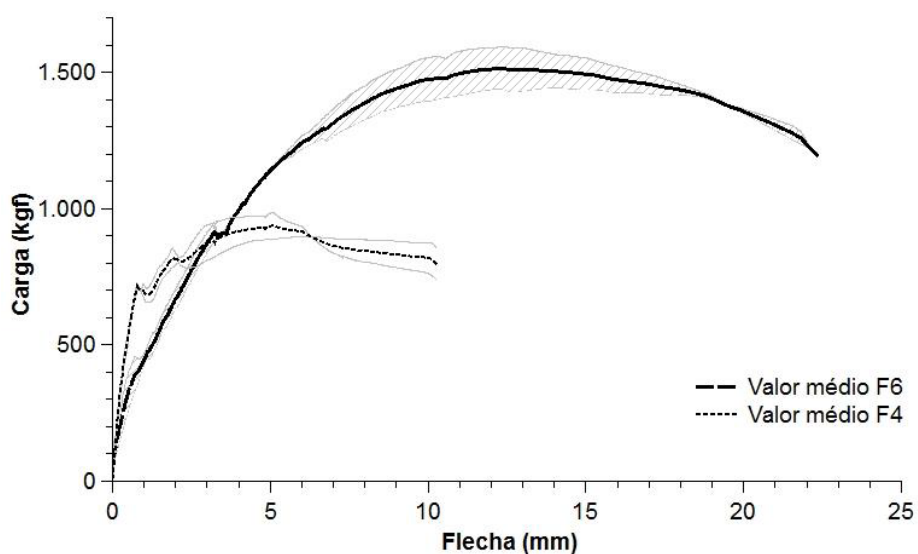
cimbramento que corresponde à estrutura do molde e ao escoramento (LEITE, 2019). Dessa maneira, conforme Leite (2019), a Figura 11 apresenta a curva carga em função da flecha no ensaio de flexão das fôrmas permanentes sob aplicação de carga distribuída.

Figura 10 - (A) Viga de concreto armado e (B) fôrma permanente com fibras de sisal.



Fonte: (LEITE, 2019).

Figura 11 - Flexão de fôrmas permanentes com carga distribuída.



Fonte: (LEITE, 2019).

Leite (2019) mostrou que o comportamento mecânico das fôrmas permanentes foi influenciado pelo teor de fibras de sisal. Isso ocorre, pois a fôrma permanente substitui cerca de 31,6% da área da seção transversal do concreto (referência), e o uso de elementos construtivos com 4% (F4) e 6% (F6) de fibras de sisal reduziu a deformabilidade da viga na flexão, conforme a Figura 11 (LEITE, 2019). Entretanto, a utilização dos elementos construtivos, em vigas de concreto armado, com 6% de fibras apresentaram ganho de resistência após a abertura da primeira fissura, o que não ocorreu com a adição de 4% dessas fibras, mesmo assim, ambas as fôrmas permanentes mantiveram a integridade e a tenacidade do elemento estrutural (LEITE, 2019).

O desenvolvimento de elementos construtivos, em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, que possam ser utilizados como fôrmas permanentes, traz uma perspectiva de inovação tecnológica, principalmente, no âmbito sustentável. Com isso, o uso de fibras de sisal nesses compósitos é uma alternativa para diminuir a geração de resíduos e, conseqüentemente, reduzir o impacto ambiental.

2.2 FIBRAS DE SISAL EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

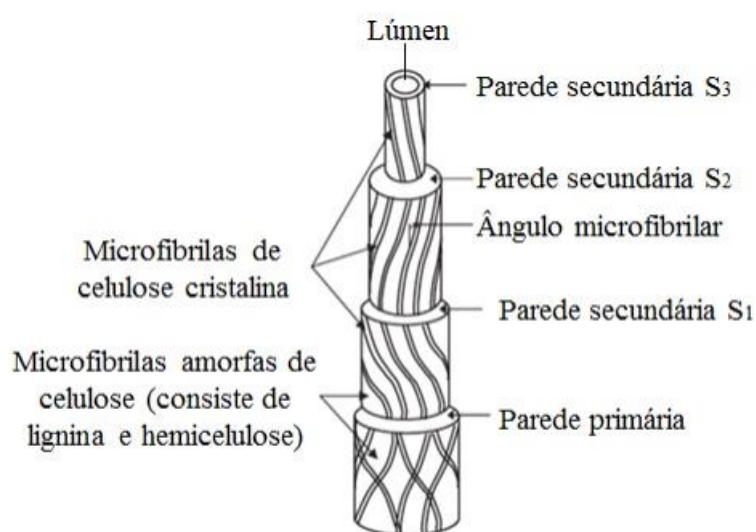
As fibras vegetais (lignocelulósicas), extraídas das folhas do sisal (*Agave Sisalana*) e cultivadas no semiárido brasileiro, têm sido usadas para o reforço de compósitos de matriz cimentícia (LIMA *et al.*, 2017), sendo que uma de suas principais vantagens é a excelente resistência à tração, da ordem de 400 MPa (LIMA *et al.*, 2018).

As fibras de sisal absorvem água, porque são materiais de natureza hidrofílica, devido ao alto teor de polissacarídeos (celulose, hemicelulose e lignina) e por apresentarem grupos polares (hidroxilas) nas suas estruturas, o que influencia na interface fibra-matriz (MEGIATTO JR., 2006; JOHN; THOMAS, 2008; FARUK *et al.*, 2012). O centro da célula, onde se encontra o lúmen, que dá à fibra de sisal uma estrutura porosa, é responsável pela grande capacidade de absorção de água livre e pode induzir uma variação volumétrica das fibras no interior do compósito, levando ao desenvolvimento de tensões internas e perda de aderência (KABIR *et al.*, 2012; CÉLINO *et al.*, 2014). A partir disso, infere-se que quanto maior o teor de fibras

adicionado a uma matriz, maior será a quantidade de água absorvida por elas, o que, por sua vez, influencia no índice de absorção de água do compósito.

A estrutura celular dessas fibras vegetais é integrada por duas camadas principais: uma parede primária formada durante o crescimento da célula (representa cerca de 10% da seção total) (KABIR, 2012; CÉLINO *et al.*, 2014); e uma parede secundária, de maior proporção (90%), que é subdividida em outras três camadas (S1, S2 e S3). Cada camada é composta por microfibrilas de celulose cristalina, conforme a Figura 12 (KABIR, 2012; CÉLINO *et al.*, 2014). A camada S3, mais interna, forma o vazio conhecido por lúmen. A parede celular secundária é envolvida pela primária, uma camada não cristalina de lignina e hemicelulose (SAVASTANO JR., 2000; FAGURY, 2005).

Figura 12 - Representação da estrutura celular de uma fibra vegetal.



Fonte: (Adaptado de KABIR, 2012).

Segundo Silva (2017a) existem três formas de presença de água nas fibras, são elas: água livre ou capilar (relacionada com a presença de poros permeáveis que aumenta a área dos lúmens e favorecem o fluxo de água); água adsorvida ou impregnada (forma ligações secundárias do tipo Van der Waals); água de constituição ou de ligação (baseada na reação química entre os grupos polares dos componentes químicos das fibras com as moléculas de água).

De acordo com Agopyan *et al.* (2005), Savastano Jr. e Agopyan (1999), a relação água-aglomerante (w/agl) influencia no transporte de água por absorção, em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, pois, à medida que essa relação aumenta, a porosidade dos compósitos também aumentam. Esse mecanismo de transporte ocorre devido à diferença de umidade ou devido à tensão superficial atuante nos poros capilares (BERTOLINI *et al.*, 2004).

O transporte de água também pode acontecer por difusão pelas fibras. Segundo Silva (2006), isso ocorre devido a um gradiente de concentração e depende dos seguintes fatores: polaridade da estrutura da molécula, presença de compostos químicos que possam formar ligações do tipo pontes de hidrogênio com a água, grau de entrecruzamento (caso exista), presença de monômero residual ou outros grupos que ataquem as moléculas de água e a cristalinidade.

A permeabilidade da água é outro mecanismo de transporte que ocorre por diferença de pressão e que influencia em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, pois, ela diminui ou aumenta dependendo da capacidade da absorção de água da fibra. Conforme Tonoli *et al.* (2011), a permeabilidade tem relação com a resistência à penetração de agentes deletérios e, também, com as propriedades da microestrutura como, por exemplo, o empacotamento das partículas e a conectividade entre os poros permeáveis.

O conhecimento sobre esses mecanismos de transporte de água se torna imprescindível para a observação dos fenômenos de degradação e para a análise de durabilidade de estruturas que utilizam compósitos vegetais. Segundo Lima (2004), os principais problemas de durabilidade dos compósitos reforçados com materiais de origem vegetal estão relacionados à deterioração e enfraquecimento da fibra, causados por uma combinação de diversos fenômenos, como, por exemplo, o ataque alcalino e a mineralização da fibra, devido à migração de produtos de hidratação do cimento para o lúmen, e variação volumétrica da fibra devido à alta absorção de água.

A fim de reduzir a capacidade de absorção de água pela fibra de sisal, melhorar a sua aderência com a matriz, devido à diminuição da variação volumétrica, e o comportamento mecânico do compósito, diversos tratamentos têm sido propostos a esse material como, por exemplo, a hornificação. Esse beneficiamento físico das fibras de sisal corresponde a ciclos sucessivos de molhagem, imersão em água à temperatura ambiente durante 3 horas, e secagem em uma estufa à 80°C por 16

horas, conforme a metodologia desenvolvida por Ferreira *et al.* (2012) e adotada por Santos e Lima (2013), Roque (2015), Ferreira *et al.* (2017), Lima *et al.* (2018) e Leite (2019).

Dentre os benefícios promovidos pela hornificação, destacam-se a redução do lúmen e a expansão das paredes celulares, as quais reduzem a capacidade de inchamento das fibras (FERREIRA *et al.*, 2012). A hornificação também contribui para a durabilidade de fibras vegetais usadas em matrizes cimentícias devido à redução de produtos hidratados do cimento no interior do lúmen, o que evita a mineralização das fibras e a degradação da celulose em ambientes alcalinos (BALLESTEROS *et al.*, 2017). Além disso, esse beneficiamento físico dispensa a utilização de produtos químicos, os quais podem proporcionar danos à natureza quando descartados.

Os efeitos desse tratamento físico dependem do número de ciclos realizados e do tipo de fibra vegetal, em decorrência principalmente da composição química de cada uma. No trabalho desenvolvido por Ferreira *et al.* (2017), os números de ciclos de hornificação variaram de 5 a 10 vezes e foi observado que a estrutura morfológica das fibras apresentaram delaminação entre as fibrocélulas e a lamela média para as espécies juta e curauá, diferentemente da fibra de sisal. Esse comportamento está relacionado com o maior percentual de celulose encontrado nas fibras de juta e curauá, promovendo o enrijecimento precoce desta estrutura, em comparação às fibras de sisal as quais mantiveram estabilidade dimensional durante os ciclos de hornificação (FERREIRA *et al.*, 2017).

De acordo com Toledo Filho *et al.* (2009), existem, também, algumas técnicas que contribuem para o aumento da durabilidade e vida útil dos materiais compósitos reforçados com fibras vegetais, pois reduz-se o ataque alcalino e o efeito de mineralização da fibra, que contribuiriam para a perda de aderência entre a fibra e a matriz. A primeira delas é a substituição total do cimento Portland por um aglomerante de baixa alcalinidade, sem clínquer, a partir de escória de alto forno ativada com sulfato de cálcio (SAVASTANO *et al.*, 2002). A adição de sílica ativa, que não danifica à matriz cimentícia (TOLEDO FILHO *et al.*, 2003) e a substituição parcial ao cimento Portland por materiais pozolânicos, que são empregados com objetivo de consumir o hidróxido de cálcio (gerado pela hidratação do cimento e que reduz a alcalinidade da matriz), que é um agente degradante das fibras naturais (TOLEDO FILHO *et al.*, 2009; SILVEIRA, 2018).

As adições pozolânicas como, por exemplo, a sílica ativa e cinza volante contribuem para a durabilidade devido a dois efeitos: a reação pozolânica (efeito químico) na formação do C-S-H que é um componente que ocupa um volume maior, preenchendo os poros na pasta de cimento ou efeito fíler (físico), aumentando, assim, a resistência mecânica do material. Isso provoca diminuição da entrada de agentes agressivos, devido à redução da interconectividade dos poros (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Uma vez mitigada a degradação das fibras vegetais (por mineralização e por ataque alcalino), verifica-se que os compósitos com fibras de sisal apresentam grande potencialidade para aplicações em elementos construtivos. Isso ocorre pois, com a melhoria da aderência entre a fibra e a matriz, é possível aumentar o controle de fissuração e a diminuir a entrada de agentes deletérios, principalmente, pela zona de transição.

Nesse sentido, os avanços obtidos com as pesquisas acerca da possibilidade de diminuição da degradação das fibras de sisal, contribuem para as discussões sobreutilização de matrizes autoadensáveis, com adições de 4% e 6% de macrofibras (40 mm) , em massa de aglomerante, o que resulta na produção de um material com maior resistência à flexão, capacidade de múltipla fissuração e ganho de tenacidade (LIMA *et al.*, 2018; LEITE, 2019).

2.3 DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO

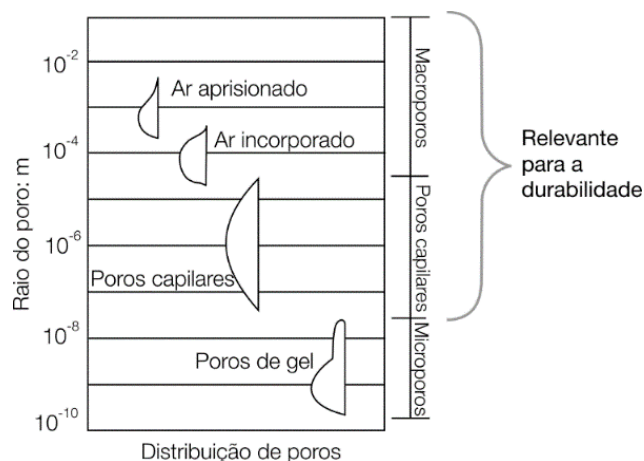
Segundo Ribeiro (2010), a proteção dos ataques externos que o concreto garante ao aço, por meio do cobrimento adequado, baseia-se no impedimento da formação de células eletroquímicas, através de proteção física e química, principalmente devido ao elevado pH do cimento. Isso mostra que a durabilidade de uma estrutura é a capacidade de esta oferecer o desempenho requerido durante um período de vida útil desejado, conforme a influência dos agentes agressivos (CEB-FIP, 2006).

2.3.1 Estruturas dos poros e mecanismos de transporte

A porosidade do concreto é um dos principais fatores que afetam a durabilidade das estruturas de concreto armado (METHA; MONTEIRO, 2014). Desse modo, a

Figura 13 apresenta as dimensões dos poros na pasta de cimento hidratada (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Figura 13 - Dimensões dos poros na pasta de cimento hidratada.



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018).

De acordo com Ribeiro *et al.* (2018), os poros são divididos em: interlaminares ou interpartículas (pouco acessíveis); capilares (oriundos da saída de água livre no concreto); macroporos ou de compactação (controladores de tensão e influenciam na resistência e permeabilidade da pasta de cimento hidratada, sendo eles de ar aprisionado e de ar incorporado); e os microporos ou poros de gel (responsáveis pela retração por secagem e pela fluência), conforme a Figura 13.

Dentre os vazios presentes no concreto, os macroporos e, principalmente, os poros capilares são os que mais influenciam na durabilidade do concreto, segundo a Figura 13, pois os capilares favorecem a penetração de agentes agressivos no interior do concreto, porque normalmente são interconectados (RIBEIRO *et al.*, 2018).

De acordo com Azzini *et al.* (1989), o tamanho do lúmen de uma fibra de sisal é na ordem 5,99 μm e Savastano Jr (2000) afirma que essa cavidade central de seção elíptica têm dimensões variando entre 5 μm e 10 μm . Comparando-se o tamanho do lúmen com as dimensões dos poros existentes na pasta de cimento hidratada (Figura 13), é perceptível que o componente da fibra de sisal encontra-se na faixa de poros capilares, em que é possível a entrada de agentes deletérios pelo lúmen. Desse modo, Savastano Jr. (2000) afirma que as lacunas e os lúmens são responsáveis pelos poros

permeáveis nas fibras vegetais, o que eleva a capacidade de absorção de água pelas fibras.

Savastano Jr. (2000) também diz que a zona ou auréola de transição, região da pasta de aglomerante próximo à fibra, apresenta espessura entre 10 µm e 100 µm. Isso mostra que, de maneira comparativa com os poros na pasta de cimento hidratada, a zona de transição também é classificada como poros capilares, isto é, a dimensão dessa é relevante para a durabilidade dos compósitos cimentícios com fibras vegetais.

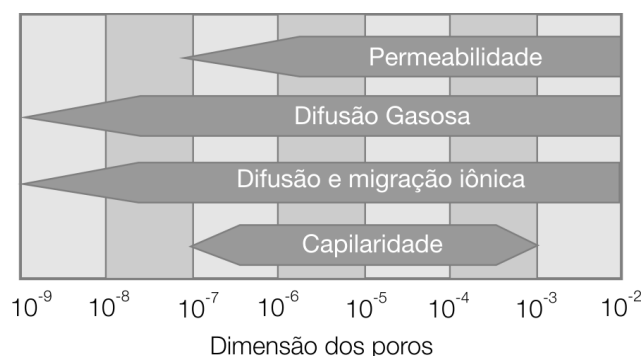
Existem quatro mecanismos de transporte de líquidos e gases pelos poros do concreto: permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração iônica. Mendes (2009) afirma que a permeabilidade ocorre quando um líquido ou gás passa através de um sólido poroso sob uma diferença de pressão. De acordo com Ribeiro *et al.* (2018), a conexão entre os poros é a principal causa para permeabilidade da pasta de cimento, que reduz com a evolução da hidratação, devido ao tamponamento de poros.

A absorção capilar é o fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade ou transporte de líquidos e à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Isso ocorre, porque as matrizes cimentícias apresentam uma microestrutura de poros capilares e as tensões existentes nestes poros gerarão forças de sucção, resultando no transporte destes fluídos (BERTOLINI *et al.*, 2004).

Conforme Pinto (2016), a difusão é a movimentação espontânea de íons ou moléculas que acontece devido a um gradiente de concentração em que eles se difundem da região de maior concentração para a de menor concentração. A migração iônica é o movimento dos íons, que utiliza como força motriz a diferença de potencial (ddp), possibilitando o deslocamento dos íons presentes até que se neutralize o efeito da ddp (RIBEIRO *et al.*, 2018).

A partir do que foi apresentado, percebe-se, na Figura 14, uma associação entre a dimensão do tamanho de poros, sua relevância para a durabilidade (capilares e macroporos) e os mecanismos de transporte. Isso mostra que os poros com dimensões entre 10^{-7} e 10^{-2} m contribuem para a entrada de agentes agressivos por meio de permeabilidade, difusão, migração iônica e capilaridade, já os poros inferiores a 10^{-7} m, favorecem o transporte de massa por meio de difusão gasosa, difusão e migração iônica.

Figura 14 - Dimensão dos poros associada aos poros capilares e capilares e os mecanismos de transporte.



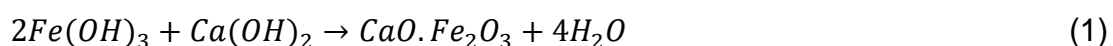
Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018).

2.3.2 Importância do cobrimento das armaduras

O cobrimento do concreto tem a finalidade de proteger as armaduras da ação de agentes deletérios provenientes do ambiente. Ele é o principal responsável pela durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado, protegendo o aço tanto de maneira física quanto química (HELENE, 1986; DAL MOLIN, 1988; TAKATA, 2009).

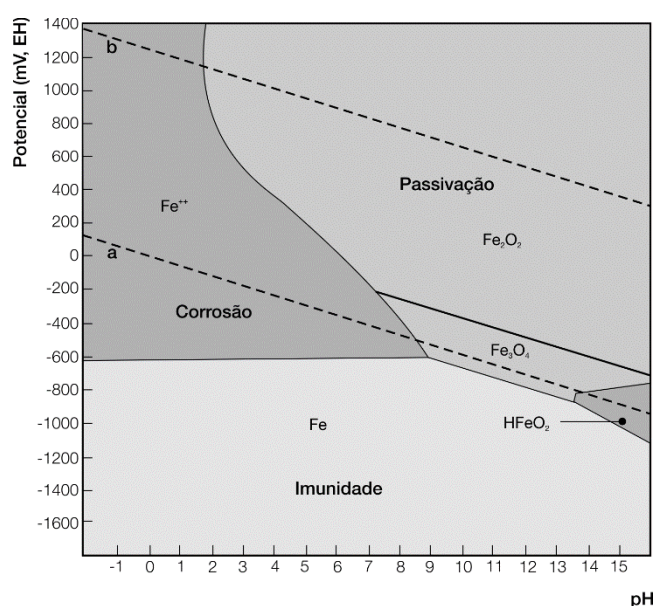
A fim de proteger essas estruturas do uso inadequado quanto aos eventuais impactos mecânicos, isto é, uma proteção física, o cobrimento evita a exposição das armaduras ao ambiente, conseqüentemente, dificulta o contato destas com agentes agressivos, o que ocorre por meio de poros e fissuras do concreto (TAKATA, 2009). Dessa maneira, esse cobrimento de concreto precisa ter qualidade e espessura suficientes para impedir a corrosão.

Já a proteção química, de acordo com a Equação (1), é propiciada pela película protetora de ferrato de cálcio ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), na armadura, formada em ambiente alcalino a partir da reação entre hidróxido férrico [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] e o hidróxido de cálcio ou portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], o que mantém o aço no estado de passivação (HELENE, 1986). Essa proteção do aço no interior do concreto pode acontecer, entre outras manifestações patológicas, contra a carbonatação e o ataque de cloretos. No que diz respeito à carbonatação ela pode ser estimada pelas condições apresentadas no Diagrama de *Pourbaix*, conforme a Figura 15.



Esse diagrama (Figura 15) indica três possibilidades de evitar a corrosão do aço, são elas: elevar o potencial de corrosão em qualquer meio de pH acima de 2, de maneira que o aço fique na região de passivação, usando inibidores anódicos; reduzir o potencial de corrosão de modo que o aço passe para a região de imunidade, utilizando proteção catódica; e manter o aço da zona de passivação, em que o pH do meio varia de 10,5 a 13, isto é, o pH naturalmente proporcionado pela alcalinidade do concreto, desde que este seja compacto e homogêneo (RIBEIRO *et al.*, 2018).

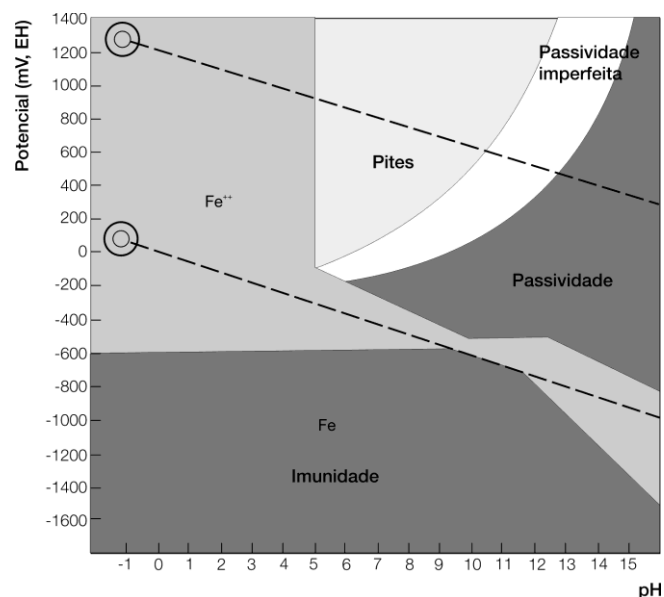
Figura 15 - Diagrama de *Pourbaix* simplificado para o sistema ferro-água a 25°C.



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018).

A proteção química contra a corrosão do aço por ação dos cloretos, por sua vez, pode ser estimada pela alteração no Diagrama de *Pourbaix*, para as condições apresentadas na Figura 16. Essa modificação no diagrama apresenta redução na zona de passivação provocada pela influência dos íons cloro. Além disso, há crescimento da zona de corrosão, composta por uma região de corrosão por pites, comum em armaduras de aço e o surgimento da zona intermediária de passividade imperfeita (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Figura 16 - Diagrama de *Pourbaix* simplificado para o sistema ferro-água com cloretos (355 ppm).



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Considerando a possibilidade de proteção física e química do revestimento para as estruturas de concreto armado, o revestimento nominal das armaduras pode variar de 25 a 50 mm, em função das classes de agressividade do ambiente, como mostra a Tabela 1. A definição do revestimento nominal é fundamental para determinação da durabilidade e vida útil da estrutura de concreto exposto às diversas classes de agressividade ambiental, conforme NBR 6118 (ABNT, 2014a).

Tabela 1 - Revestimento nominal das armaduras, em função das classes de agressividade, de acordo com a NBR 6118:2014.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I Fracas	II Moderada	III Forte	IV Muito forte
Concreto armado	Viga	Cobrimento nominal (mm)			
		25	30	40	50

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014a).

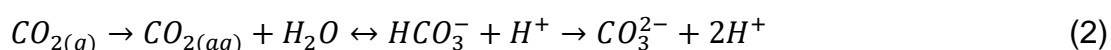
A NBR 15575 (ABNT, 2013) define que a vida útil de projeto (VUP) de uma estrutura deve ser igual a, no mínimo, 50 anos, podendo ser de 63 anos (intermediário) ou 75 anos (superior), a depender da importância e da especificidade da estrutura.

Por outro lado, a norma não indica como essa VUP deve ser alcançada, trazendo apenas indicativos de que devem ser feitas análises de projetos, realizados ensaios preditivos e aplicados modelos de previsão de vida útil. Isso leva os pesquisadores a desenvolverem técnicas de avaliação de durabilidade e estimativa de vida útil das estruturas em concreto armado, pois, ainda não existem parâmetros normatizados a seguir em nível nacional.

2.3.3 Carbonatação

Quando os compostos alcalinos do concreto, hidróxidos de cálcio [Ca(OH)₂ ou portlandita], de potássio (KOH) e de sódio (NaOH), na presença de umidade, reagem com o dióxido de carbono (CO₂), o gás sulfídrico (H₂S) e o dióxido de enxofre (SO₂), contribuem para a formação do carbonato de cálcio, que reduz o pH da solução existente nos poros do concreto (HOUST; WITTMANN, 2002; ISAIA *et al.*, 2005; GENTIL, 2007). Outros compostos da pasta de cimento hidratada (silicato de cálcio hidratado e aluminatos) também podem reagir com o dióxido de carbono e formar o carbonato de cálcio, que é o principal produto da carbonatação (TAYLOR, 1997).

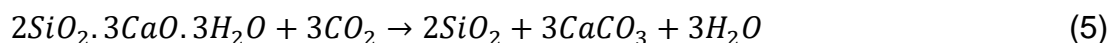
A carbonatação se inicia com a entrada do dióxido de carbono nos poros do concreto e sua dissolução em água, com posterior reação com o H⁺ disponível, levando à formação de CO₃²⁻, conforme Equação 2 (MONTEMOR *et al.*, 2002).



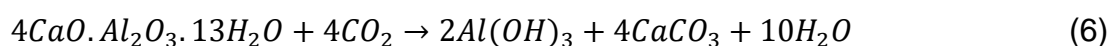
Em seguida, na solução dos poros do cimento, são disponibilizados os íons OH⁻ e Ca²⁺, principalmente oriundos da dissolução do hidróxido de cálcio (Equação 3) e, a seguir, o CO₃²⁻ reage com o Ca²⁺, formando o carbonato de cálcio, segundo a Equação 4 (MONTEMOR *et al.*, 2002).



A seguir, ocorre a reação com silicato de cálcio hidratado (C-S-H), de acordo com a Equação 5 e com as fases aluminatos (C_4AH_x), segundo a Equação 6, sempre produzindo carbonato de cálcio e água (TAYLOR, 1997).



ou



Assim, de forma resumida, a carbonatação pode ser representada pela Equação 7 (MONTEMOR *et al.*, 2002).



A carbonatação de compostos KOH e NaOH presentes no cimento hidratado, é semelhante à ocorrida nos $Ca(OH)_2$, tendo as equações resumidas apresentadas nas Equações (8) a (11), conforme Houst e Wittmann (2002):



Em situações excepcionais, quando há excesso de CO_2 na presença de água, é possível a formação do bicarbonato de cálcio, conforme Equação 12, o que favorece a ocorrência de um processo corrosivo do aço de maneira catastrófica, devido ao comportamento ácido, que reduz o pH do concreto (MONTEMOR *et al.*, 2002).



Existem alguns fatores que influenciam na velocidade de carbonatação. São eles: a relação água-cimento (o fluxo de água e de CO_2 ocorre entre os poros

interconectados); o consumo e tipo de cimento (associados à reserva alcalina presente na matriz cimentícia hidratada); a presença de adições minerais (devido aos efeitos fíler e pozolânico), as condições de cura mais eficientes (promovem a hidratação do cimento); a presença de fissuras (permitem a entrada mais rápida de agentes agressivos); a concentração de CO₂, a umidade relativa do ar, o grau de saturação dos poros e a temperatura (em condições específicas) (SILVA, 2017b; RIBEIRO *et al.*, 2018).

A formação dos carbonatos não deteriora o concreto, uma vez que os produtos carbonatados têm um peso molar maior que os compostos da pasta de cimento hidratada, resultando em um refinamento dos poros, aumentando a sua resistência e dificultando a entrada de agentes agressivos. Porém, durante a sua formação, ocorre o consumo dos álcalis da pasta cimentícia, reduzindo o pH (alcalinidade), o que modifica as condições de estabilidade química da película passivadora do aço e, conseqüentemente, provoca a corrosão (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Além disso, a carbonatação contribui para liberação de cloretos ligados na matriz do concreto. Isso ocorre, pois, a diminuição do pH auxilia o rompimento das ligações entre o aluminato tricálcio (C₃A) e os íons cloro, tornando-os disponíveis para aumentar a corrosão (BROOMFIELD, 2006).

A carbonatação ocorre nos compósitos com fibras, de maneira semelhante ao concreto armado, através da difusão de dióxido de carbono pelos poros não saturados da matriz de cimento, e através de sua reação com os produtos de hidratação do cimento Portland, principalmente hidróxido de cálcio e fases C-S-H (PIZZOL *et al.*, 2014).

Nos concretos e argamassas reforçados com fibras vegetais a carbonatação pode melhorar a durabilidade desses, diferentemente do concreto armado, pois com a diminuição da alcalinidade da matriz devido à redução do teor de hidróxido de cálcio, ou seja, diminui o pH do meio, o que resulta em maior quantidade de carbonato de cálcio, que é um composto insolúvel em água e mais denso que o hidróxido de cálcio e torna o meio menos agressivo para as fibras (TOLEDO FILHO *et al.* 2003; ALMEIDA *et al.*, 2010; ALMEIDA *et al.*, 2013). Isso torna o compósito menos poroso, o que contribui para a melhoria das propriedades mecânicas da matriz cimentícia (TONOLI *et al.*, 2010; NEVES JUNIOR, 2014) e dificulta a entrada de outros agentes agressivos como, por exemplo, os íons cloro. Logo, de acordo com Tonoli *et al.* (2011) e Neves

Junior *et al.* (2017) a carbonatação acelerada em compósitos cimentícios apresenta-se como uma alternativa de sequestro de carbono, o que contribui ainda mais para caráter sustentável dos compósitos com fibras vegetais.

De acordo com Ferrara *et al.* (2017), foi demonstrado que as fibras vegetais, devido às suas estruturas porosas, favorecem a carbonatação, cujos produtos desse fenômeno selam as fissuras e se reconstróem através da matriz, melhorando a interação fibra-matriz, contribuindo assim para a recuperação das propriedades mecânicas do compósito.

Existem diversos métodos para avaliar a frente de carbonatação. Dentro desse contexto, estão os prismas de Nicol, a difração de raios X (DRX), a análise térmica diferencial (*DTA*), termogravimetria (TG/DTG) e observação microscópica, entretanto, os indicadores de pH à base de fenolftaleína e timolftaleína são os mais utilizados (ISAIA *et al.*, 2005; RIBEIRO *et al.*, 2018). Além da aspensão de fenolftaleína e da DRX (RAMLI, KWAN; ABAS, 2013), a TG/DTG (PIZZOL *et al.*, 2014) existem outros métodos que são utilizados para avaliar e complementar a análise da frente de carbonatação em compósitos reforçados com fibras vegetais, são eles: o envelhecimento acelerado associado aos ciclos de molhagem e secagem (CORREIA *et al.*, 2016); e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) (RAMLI, KWAN; ABAS, 2013; PIZZOL *et al.*, 2014).

Para se realizar o estudo da carbonatação, costuma-se utilizar câmaras de carbonatação, a fim de acelerar o fenômeno. Apesar de não existirem normas nacionais, existem três normas internacionais que tratam dos procedimentos de exposição dos corpos de prova, são elas: a ISO 1920-12 (ISO, 2015), a RILEM CPC-18 (RILEM, 1988) e a EN 13295 (CEN, 2004). A ISO 1920-12 (ISO, 2015) utiliza uma concentração de CO₂ de (3,0 ± 0,5)%, temperatura de (27 ± 2)°C e umidade de (65 ± 5)%, devendo o fluxo de dióxido de carbono ser unidirecional e os corpos de prova serem prismáticos (SILVA *et al.*, 2009; DILONARDO *et al.* 2015).

2.3.4 Corrosão por ação dos cloretos

Segundo Kumar *et al.* (2017) a quantidade de cloretos necessária para iniciar a corrosão é parcialmente dependente do valor do pH da água nos poros do compósito

em que, se o pH for inferior a 11,5, pode ocorrer corrosão das armaduras, do contrário pode não haver corrosão.

De acordo com Cascudo (1997) e Ribeiro *et al.* (2018), os íons cloro podem estar no concreto de três maneiras: adsorvidos fisicamente na superfície dos poros capilares; quimicamente combinados ao aluminato tricálcio (C₃A) formando o cloroaluminatos de cálcio (C₃A.CaCl₂.10H₂O) ou sal de Friedel; e livres na solução contida nos poros, sendo mais disponíveis para reagir.

Os íons cloro podem destruir a película passivadora das armaduras, proporcionada pelo meio alcalino e acelerar permanentemente a corrosão, porque os cloretos livres não são consumidos na reação, apenas formam um composto intermediário e são liberados, conforme pode ser visualizado nas Equações 13 e 14 (HELENE, 1999 *apud* RIBEIRO 2010).



A velocidade do transporte de íons cloro no concreto é influenciada por diversos fatores. Em ambientes agressivos, os fatores preponderantes que influenciam nessa velocidade e conseqüentemente, na durabilidade do concreto são: a relação água-cimento (rede interconectada de poros); a composição química e a finura do cimento; a efetividade da cura do concreto; o teor de argamassa no concreto; e a presença de adições minerais como, por exemplo, a sílica ativa que reduz a porosidade total, a distribuição e a interconectividade dos poros (efeito físico) (RIBEIRO *et al.*, 2018). Já a cinza volante, por ser rica em aluminatos, pode favorecer a fixação de cloretos, com a formação do sal de Friedel, o que também pode levar a uma diminuição da porosidade do concreto (CHOUSIDIS *et al.*, 2015).

Segundo Banthia e Bhargava (2007), Bhargava e Banthia (2008) e Ramli, Kwan e Abas (2013) os íons de cloro penetram nos compósitos reforçados com fibras vegetais através de absorção e difusão, e quando a água livre evapora, os íons cloreto permanecem no compósito. Além disso, durante a evaporação, o movimento da água livre da superfície interna para a externa também ajuda a transportar os cloretos para

a camada externa (RAMLI, KWAN; ABAS, 2013) e a penetração de cloretos também depende da permeabilidade do compósito à água (BANTHIA; BHARGAVA, 2007; BHARGAVA; BANTHIA, 2008).

A adição de fibras de sisal na matriz promove aspectos positivos e negativos quanto à durabilidade dos compósitos cimentícios. De maneira negativa, é possível que as fibras vegetais funcionem como caminhos preferenciais para entrada de agentes agressivos como, por exemplo, os íons cloro tanto pelo lúmen da fibra, durante a absorção de água, quanto pelos poros existentes na zona de transição entre as fibras e a matriz cimentícia (COSTA, 2015). Entretanto, as fibras retardam o início e a propagação de trincas na matriz de compósito sob tensão e deformação última, o que pode reduzir a entrada de agentes deletérios (BANTHIA; BHARGAVA, 2007; BHARGAVA; BANTHIA 2008; SAPPAKITTIPAKORN; BANTHIA, 2012; BONATO, 2014).

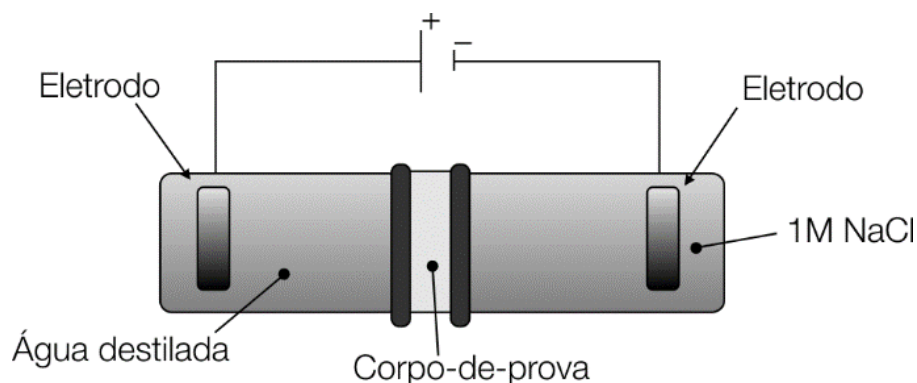
Entretanto, as fibras controlam a propagação de fissuras na matriz cimentícia, o que pode dificultar a entrada de agentes externos nesses compósitos. Para isso, é importante que o processo de mistura desses compósitos consiga dispersar adequadamente a fibra, manter a demanda de água sob controle, além de homogeneizar as matérias-primas. Desse modo, é possível aumentar a resistividade elétrica e contribuir para a durabilidade de compósitos cimentícios devido à redução da permeabilidade à água (CORREIA *et al.*, 2017).

A fim de mensurar a penetração de cloretos e sua presença no interior do concreto, diversas técnicas podem ser utilizadas, conforme será discutido a seguir.

2.3.4.1 Penetração de cloretos

Ao se considerar a importância da penetração de cloretos no concreto para a sua durabilidade, torna-se imprescindível avaliar como se dá a entrada destes íons. Os principais métodos de ensaios preditivos que estão associados ao transporte de cloretos são: a avaliação do grau de penetração dos íons cloro através da carga total passante (ASTM, 2018); o teste nórdico padrão, normatizado pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999); a avaliação da migração de cloretos por meio do aparato (Figura 17), sugerido por Andrade (1993) e desenvolvido por Ribeiro (2010).

Figura 17 - Esquema de montagem do aparato de migração de cloretos.



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Dentre os métodos citados, o aparato de migração de cloretos (Figura 17) se destaca pela baixa tensão aplicada durante a execução do ensaio. A migração ocorre em uma ddp de 12V aplicada com uma fonte de corrente contínua, através de eletrodos contidos nas células catódica (NaCl) e anódica (água destilada e deionizada) (RIBEIRO *et al.*, 2018). Esse método tem como referência a ASTM C1202 (ASTM, 2018), mas, difere desta em três quesitos: a diferença de potencial elétrico aplicada é inferior à qual a Norma indica (que seja de 60V); não há contato entre o eletrodo e o corpo de prova; e a leitura de concentração de íons cloro na célula anódica é verificada a cada 24h (até o instante em que haja um equilíbrio das concentrações de íons em ambas soluções), diferentemente da Norma em que a duração do ensaio é de 6h, com leitura da carga total passante a cada 30 min.

A avaliação da migração de cloretos por meio do aparato sugerido por Andrade (1993) e desenvolvido por Ribeiro (2010) determina o coeficiente de difusão no regime estacionário e é possível classificar o concreto conforme os limites estabelecidos por Nilsson *et al. apud* Gjorv (2015), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do concreto quanto à resistência à penetração de cloreto de acordo com os limites propostos por Nilsson *et al. apud* Gjorv (2015).

Coeficientes de difusão ($D_{ns} \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)	Resistência à penetração de cloretos
< 2,5	Extremamente alta
2,5 a 5	Muito alta
5 a 10	Alta
10 a 15	Moderada
> 15	Baixa

Fonte: (O AUTOR).

No que diz respeito a avaliação de penetração de cloretos em compósitos reforçados com fibras vegetais, foram encontradas pesquisas que utilizaram o método regulamentado pela ASTM C1202, segundo a ASTM (2018) (DE GUTIÉRREZ; DÍAZ; DELVASTO, 2005; SAPPAKITTIPAKORN; BANTHIA, 2012; PRIYA; THIRUMALINI, 2018). Além disso outras investigações indicam a possibilidade de utilização das seguintes técnicas: o teste para determinar o coeficiente de difusão aparente de cloretos, normatizado pela ASTM C1556 (ASTM, 2000; SAPPAKITTIPAKORN; BANTHIA, 2012; BALASUBRAMANIAN; SENTHILSELVAN; SABARISH, 2016); a correlação da migração de cloretos ensaios eletroquímicos como, por exemplo, o potencial de meia célula que indica a probabilidade de corrosão, conforme a norma ASTM C876 (ASTM, 1998; SAPPAKITTIPAKORN; BANTHIA, 2012); o teste de imersão em solução, contendo 10% de cloreto de sódio, em volume (KUMAR *et al.*, 2017); e o envelhecimento acelerado (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013).

É importante destacar que ainda não foram encontrados registros de pesquisas que utilizaram o aparato de migração de cloretos sugerido por Andrade (1993) e desenvolvido por Ribeiro (2010), em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais.

2.3.4.2 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica de um material cimentício é uma propriedade que representa a dificuldade com que a corrente elétrica atravessa esse material, através da solução aquosa dos poros (RIBEIRO *et al.*, 2018). Por ser um eletrólito forte, os cloretos aumentam a condutividade da solução eletrolítica, diminuindo a resistividade do concreto. Assim, ao medir a resistividade, indiretamente é determinado o teor de cloretos no concreto, quando saturado.

Esta técnica tem como base o princípio de Wenner e consiste na aplicação de uma diferença de potencial entre dois, quatro ou mais eletrodos, os quais podem ser posicionados em faces planas e opostas ou alinhados numa mesma face da amostra, pressionados contra a superfície, ou embutidos no interior da estrutura (MOTA, 2016).

Existem alguns órgãos normatizadores internacionais que trazem valores de referência da resistividade elétrica do concreto, em função do risco de corrosão, são eles: a Norma CEB-192 (FIB, 1989) e o Boletim Europeu COST 509 (COST, 1997),

conforme Tabela 3. A Norma americana AASHTO TP 95-14 (AASHTO, 2011) associa os resultados de resistividade elétrica do concreto com a probabilidade de penetração de íons cloreto, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 3 - Valores de resistividade elétrica do concreto e sua relação com o risco de ocorrência da corrosão, conforme normatização internacional.

Resistividade elétrica (kΩ.cm)		Risco de corrosão
CEB-192	COST 509	
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
-	10 a 50	Moderado
5 a 10	< 10	Alto
< 5	-	Muito Alto

Fonte: (O AUTOR).

Tabela 4 - Relação entre resistividade elétrica superficial e penetração de cloretos (AASHTO TP 95-14).

Resistividade elétrica (kΩ.cm)	Intensidade de penetração de cloretos
< 12	Forte
12 a 21	Moderada
21 a 37	Fraca
37 a 254	Muito Fraca
> 254	Desprezível

Fonte: (O AUTOR).

Além do método dos quatro eletrodos (Wenner) conforme (KAKOOEI *et al.*, 2012; BAEZA *et al.*, 2013; FRAZÃO *et al.*, 2015), duas técnicas têm sido utilizadas para avaliar a resistividade elétrica em compósitos cimentícios reforçados com fibras. A primeira delas é técnica de dois eletrodos (também pelo método de Wenner) que consiste na aplicação de corrente contínua ou alternada entre duas sondas metálicas embutidas na amostra conforme, em que é gerada uma ddp previamente definida (KOZŁOWSKI; WŁADYKA-PRZYBYLAK, 2008; NILI; AFROUGHSAKET, 2012a; 2012b; SÖYLEV; ÖZTURAN, 2014; FIALA *et al.*, 2016). A espectroscopia por impedância eletroquímica é outra técnica utilizada para avaliar a resistividade elétrica de compósitos com fibras. Esse método consiste na análise da resposta de um material

diante da aplicação de um sinal de corrente alternada, para uma varredura de frequências. Essa resposta dos sistemas eletroquímicos depende da frequência inicial que foi aplicada e, com isso, permite a aquisição de informações sobre os processos cinéticos ocorridos na interface eletrodo/eletrólito (AFROUGHSAKET; OZBAKKALOGLU; 2015; SONG *et al.*, 2018).

No que diz respeito à resistividade elétrica dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, sabe-se que é influenciada pela alteração da porosidade que as fibras promovem na matriz (KHUSHNOOD *et al.*, 2018). Com isso, este tipo de reforço pode facilitar a entrada de agentes deletérios como, por exemplo, os cloretos. Esses íons podem passar tanto pela zona de transição entre a fibra e a matriz, quanto pelo lúmen das fibras vegetais, já que estas possuem natureza hidrofílica e podem transportar agentes agressivos quando absorvem água.

Verifica-se ainda que a resistividade elétrica está relacionada à estrutura interna e à composição química de fibras (KOZŁOWSKI; WŁADYKA-PRZYBYLAK, 2008).

2.4 DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

2.4.1 Absorção de água

A avaliação dos parâmetros físicos (coeficiente de absorção, índices de vazios e densidade aparente), em argamassas e concretos reforçados com fibras curtas, é importante para visualizar o quanto esses materiais permitem ou não a passagem de agentes deletérios, em função do teor de fibras na matriz cimentícia.

2.3.1.1 Absorção de água por imersão

Borges, Motta e Pinto (2019) estudaram concretos (w/c 0,60) com adições de 0,25% e 0,5% de fibras vegetais (sisal e rami) e de 0,25% de fibras de polipropileno, em volume. Essas autoras observaram que à medida que foi elevado os teores de fibras vegetais, a absorção e a porosidade também aumentaram, devido à natureza da fibra e pela tendência em aumentar a incorporação de ar durante o processo de mistura. Entretanto, para o percentual adicionado de fibras de polipropileno, os valores de absorção e de porosidade diminuíram. Isso ocorre, pois, a porosidade na interface fibra de polipropileno-matriz não foi elevada, devido à sua natureza hidrofóbica, e pelo

fato de não haver variações dimensionais no interior da matriz (BORGES; MOTTA; PINTO, 2019).

Tessaro *et al.* (2015) afirmam que a adição de 2%, 5% e 10% de fibras de eucalipto, em massa, nos compósitos cimentícios, contribuem para o aumento dos valores de absorção de água e índices de vazios. Azevedo *et al.* (2020) dizem que o aumento do percentual de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de fibras de abacaxi, em massa, nos compósitos de matriz cimentícia (w/c 1,2), elevaram os valores de porosidade e absorção de água. Dessa maneira, a característica higroscópica dessas fibras vegetais torna esses compósitos menos densos e mais susceptíveis à entrada de água.

Lima (2004) avaliou algumas propriedades físicas como porosidade total, absorção e massa específica, de compósitos com 1%, 2% e 3% de fibras de sisal, em massa, e relação w/agl 0,40. Nessa pesquisa foi verificado que o aumento do percentual de fibras influencia na consistência da mistura, em função da redução da trabalhabilidade dos compósitos que, conseqüentemente, possuem maiores quantidades de poros no estado endurecido (LIMA, 2004).

Roque (2015) e Lima *et al.* (2018) adicionaram 6%, em massa, de fibras curtas e dispersas de sisal em compósitos com relação água-aglomerante de 0,35. Esses autores perceberam que houve aumento de absorção de água por imersão, o que reduziu a densidade aparente e aumentou a porosidade aparente dos compósitos. Isso tem relação tanto com a incorporação de ar pelas fibras durante a mistura das matérias-primas e lançamento do compósito, quanto com redução da trabalhabilidade durante o adensamento e moldagem das amostras (ROQUE, 2015; LIMA *et al.*, 2018).

Ferreira *et al.* (2012) e Melo Filho (2012) produziram misturas com 2%, 4% e 6% de fibras de sisal, em massa, como reforço de matrizes cimentícias com relações w/agl 0,40 e 0,45, respectivamente. Esses estudos mostraram que com o aumento do teor de fibras, houve crescimento da absorção de água e do índice de vazios dos compósitos. Segundo Ferreira *et al.* (2012) e Melo Filho (2012), a influência das fibras nas propriedades físicas do compósito tem relação com a dificuldade de dispersar as fibras, à medida que são aumentados os percentuais dessas, e com a capacidade de incorporação de ar durante a etapa de mistura.

Okeola, Abuodha e Mwero (2018) utilizaram 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% de fibras de sisal, em massa, para uma mesma relação água-cimento (w/c) de 0,47 e as fibras foram tratadas por imersão em solução contendo sílica ativa, a fim de aumentar sua durabilidade antes de incorporá-las ao concreto. Os resultados indicam que quanto maior o teor de fibra adicionada, maior a absorção de água por imersão devido à perda de trabalhabilidade, o que dificultou o adensamento, reduziu a densidade e aumentou a porosidade (OKEOLA; ABUODHA; MWERO, 2018). Isso pode ter ocorrido tanto pela natureza polar e hidrofílica dessas fibras vegetais, quanto pelo aumento das proporções de fibras nas misturas estudadas, o que ratifica o estudo de concretos reforçados com fibras vegetais desenvolvido por Tessaro *et al.* (2015), Borges, Motta e Pinto (2019) e Azevedo *et al.* (2020).

Além disso, a relação água-cimento é outro fator que influencia na porosidade do material. Rahmani *et al.* (2011) e por Hidayat, Mutuku e Mwero (2017) utilizaram fibras poliméricas e observaram que a presença de fibras pode levar ao aumento do efeito capilar, pois, as fibras desempenham o papel de canais e conduzem a água para dentro do concreto, o que facilita a conexão entre poros de modo que a entrada da água aumente. Hidayat, Mutuku e Mwero (2017) em consonância com Rahmani *et al.* (2011), afirmam que a dificuldade durante o adensamento, que leva a má adesão entre as fibras e a matriz, e isso aumentou o número de poros nas amostras, fazendo com que elas absorvessem mais água. Como resultado, isso torna o concreto reforçado com fibras poliméricas mais suscetível a danos quando exposto a ambientes agressivos e, portanto, tornando esse tipo de concreto menos durável.

Acredita-se que nessas pesquisas sobre concretos reforçados com fibras sintéticas, a entrada da água pode ter ocorrido pela zona de transição formada entre as fibras e a matriz, além da presença de agregado graúdos nas misturas e dos valores de relações água-cimento de 0,47 e 0,57, o que intensifica ainda mais a passagem de água por essa região.

Afroughsabet e Ozbakkaloglu (2015), contudo, relatam que a adição de 10% sílica ativa pode contribuir para a redução significativa da absorção de água por imersão do concreto reforçado com fibras de aço, com relação água-aglomerante igual 0,3, pois, limita a conectividade entre os poros e reduz a porosidade das misturas analisadas. Portanto, além da presença de adições pozolânicas em substituição

parcial do cimento, a baixa relação água/aglomerante contribuiu para o aumento da durabilidade dos materiais estudados.

2.3.1.2 Absorção por capilaridade

Lima (2004) avaliou a propriedade física de absorção de água por capilaridade em compósitos com 1%, 2% e 3% de fibras de sisal e relação w/agl 0,40, em massa. Esse autor observou que com o aumento do percentual de fibras, reduziu-se essa propriedade, devido à redução do tamanho dos poros ou a interconectividade entre eles. Borges, Motta e Pinto (2019) estudaram concretos (w/c 0,60) com adições de 0,25% e 0,5% de fibras vegetais (sisal e rami), em volume. Essas autoras perceberam que houve redução nos valores de absorção de água por capilaridade, em relação ao concreto de referência. Dessa maneira, pode ter reduzido a interconexão entre esses poros, inclusive por redução das microfissuras na matriz.

Priya e Thirumalini (2018) observaram que os concretos reforçados com fibras, com relação água/cimento 0,32, tiveram redução no coeficiente de absorção capilar para nos teores de 0,5 e 1,0% de fibras de sisal e de banana (em volume), entretanto, ao se adicionarem 1,5% dessas fibras (também em volume), houve um aumento da absorção de água. Esses resultados indicaram que, até certo limite, as fibras preenchem os poros presentes no concreto e reduzem a estrutura descontínua dos mesmos, reduzindo, assim, o volume de poros capilares, propiciando um melhor empacotamento das partículas e, conseqüentemente, diminuindo a absorção de água por capilaridade (PRIYA; THIRUMALINI, 2018).

É possível, também, que o aumento da absorção e da porosidade capilar produzida pela incorporação de fibras em uma matriz, possa ser compensado pela presença de adições pozolânicas como, por exemplo, a sílica ativa e a cinza volante, mesmo com relações água-aglomerante de 0,52 e 0,64 (DE GUTIÉRREZ; DÍAZ; DELVASTO, 2005), como consequência da redução de vazios permeáveis em compósitos reforçados, principalmente, com 2,5% de fibras de sisal (em massa).

Azevedo *et al.* (2020) analisaram o efeito de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de fibras de abacaxi em compósitos de matriz cimentícia. Esses materiais foram produzidos relação água-cimento igual a 1,2. E, apesar dessa relação ser considerada alta, os autores observaram que o principal fator de influência na absorção de água por

capilaridade foi o aumento do percentual de fibras, em massa de cimento. Isso ocorre porque a capilaridade nos materiais cimentícios está tanto à porosidade do material causado pelas fibras, quanto a presença de “poros ativos”, que consistem em uma região de tamanho específico em que ocorre o fenômeno capilar (AZEVEDO *et al.*, 2020).

Farooq, Saleem e Ahmad (2017) analisaram que, ao adicionar 0,5% de fibras de coco (em massa) em concretos com relação água-cimento igual a 0,5, houve aumento da absorção de água, em relação ao concreto de referência. Isso pode ser explicado pelo fato de as fibras vegetais (lignocelulósicas) tenderem a absorver água e aumentar a zona de transição formada pela presença de fibras e do agregado graúdo, na produção dos concretos.

Pereira, Figueredo e Bauer (2005), Bolat *et al.* (2014) e Kim *et al.* (2015) observaram que a adição de fibras sintéticas (em volume), contribuiu para a redução da absorção capilar. Esses autores avaliaram que as fibras apresentaram maior controle de fissuração do que a amostra de referência (sem fibras). Dessa maneira, as fibras sintéticas podem dificultar a entrada de agentes agressivos e contribuir para a melhoria da durabilidade de estruturas de concreto armado que utilizem essas fibras em sua composição.

2.4.2 Propagação de ondas ultrassônicas

A análise de velocidade longitudinal de ondas ultrassônicas em compósitos cimentícios reforçados com fibras é relevante para estimar a homogeneidade da amostra quanto à sua densidade, porosidade e deformabilidade.

Conforme Gonçalves (2016), a adição de 2,5%, 3,5% e 5% de fibras de coco em concretos (w/c 0,56), provocou redução nas velocidades de ondas longitudinais ultrassônicas. Isso acontece devido à incorporação de ar na matriz, durante o processo de mistura, e a superfície da fibra, por ser irregular em tamanho e forma, interfere na sua aderência com a matriz (GONÇALVES, 2016). Por se tratar de uma fibra vegetal, é possível que essas características estejam relacionadas com a absorção de água, o que leva ao aumento do índice de vazios.

Carraro (2018) comparou concretos com 8% de fibras de bambu e de aço, em volume e relação água-cimento igual a 0,61. Nesta pesquisa, percebeu que, em

relação ao concreto simples, as fibras de aço reduziram a velocidade de pulso ultrassônico, já as fibras de bambu contribuíram o aumento desta. Isso foi possível porque, as fibras de bambu tiveram maior aderência com a matriz, do que as de aço. Entretanto, foi observado no trabalho que as fibras vegetais apresentaram aumento de volume, ou seja, indica que a fibra de bambu absorveu água, sendo este um efeito que pode prejudicar o concreto em longo prazo (CARRARO, 2018).

Em concretos reforçados com fibras sintéticas, pesquisadores observaram uma tendência em reduzir a velocidade de pulso ultrassônico à medida que foi aumentado os percentuais de fibras. Dentre as causas que levaram à diminuição desta propriedade, destacam-se: a modificação da estrutura porosa dos concretos e a distribuição não uniforme das fibras na matriz, o que levou ao acúmulo de fibras em determinadas regiões das amostras e falta de fibras em outras, causando assim, aumento da porosidade dos compósitos (HENRIQUES, 2013); e a influência na zona transição formada com a matriz (KIRTHIKA; SINGH; SURYA, 2018).

Dessa maneira, percebe-se que o aumento do teor de fibras de coco, bambu, aço, polímeros e basalto influenciam negativamente na velocidade do pulso ultrassônico devido à incorporação de ar na mistura, à presença de vazios, fissuras internas e superficiais, os quais atrasam o tempo necessário para que as ondas ultrassônicas atravessem os corpos de prova. Assim, quanto menor a velocidade observada, menos compacta é a microestrutura do material.

Entretanto, outros pesquisadores afirmam que houve aumento de velocidade de pulso ultrassônico em concretos reforçados com fibras sintéticas, à medida que os percentuais de fibras foram elevados. Dessa maneira, infere-se que as amostras de concretos com fibras tenham menor porosidade, devido a menor quantidade de agregado graúdo na dosagem destes, o que leva a uma menor zona de transição e a propagação de onda ultrassônica é mais rápida (BOLAT *et al.*, 2014). Além disso, a presença de sílica ativa na mistura, através da reação pozolânica, contribuiu para o processo de hidratação do cimento e refinamento de poros, que conseqüentemente refletem tanto no aumento da velocidade ultrassônica, quanto na rigidez do concreto reforçado com fibras (BENAICHA *et al.*, 2015).

Isso significa que a técnica de propagação de ondas ultrassônicas traz indicativos das condições em que o material se encontra, sendo necessário a utilização de técnicas complementares para avaliar de fato a durabilidade desses

materiais tais como a carbonatação e o ataque por cloretos, pois são pelos poros do material por onde se deslocam os agentes agressivos.

2.4.3 Carbonatação

A análise da profundidade de carbonatação em argamassas e concretos reforçados com fibras curtas é importante para avaliar a velocidade da frente de carbonatação que avança pela estrutura porosa do material.

Pizzol *et al.* (2014) analisaram o efeito da carbonatação acelerada em compósitos híbridos de fibrocimento, com teores, em massa, de 4% de fibras de eucalipto e 2% de fibras de acetato de polivinila (PVA) produzidos pelo processo de Hatschek. Esses autores observaram, por meio de micrografias, o aumento da profundidade carbonatada, principalmente na interface entre as fibras de celulose e a matriz de cimentícia. Isso ocorreu porque a formação do CaCO_3 , devido à redução da alcalinidade da matriz, na estrutura porosa.

No trabalho desenvolvido por Ramli, Kwan e Abas (2013), avaliou-se a durabilidade do concreto reforçado com fibras de coco em ambientes agressivos (w/agl 0,37). Com isso, foi observado que a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento do teor de fibras, a partir da incorporação de 0,6%; 1,2%; 1,8% e 2,4% delas, em massa. Isso ocorre, porque a fibra natural tem uma estrutura celular porosa, aumentando, assim, a probabilidade de conexão de rede de poros. Mesmo assim, a maior profundidade de carbonatação registrada foi insuficiente para causar efeitos prejudiciais ao concreto (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013).

No que se refere aos concretos reforçados com fibras sintéticas, alguns pesquisadores observaram o aumento da profundidade carbonatada à medida que foi aumentado os teores de fibras. O principal motivo observado sobre esse fenômeno foi o adensamento, com mesa vibratória, o qual pode ter deslocado e acumulado as fibras nas camadas superficiais da amostra, por serem menos densas que o agregado graúdo (BOLAT *et al.*, 2014).

Diante do que foi apresentado, percebe-se que há o aumento da profundidade carbonatada, à medida que, se eleva o teor de fibras sintéticas e/ou naturais nos concretos e argamassas. Além disso, o aumento da profundidade carbonatada pode proporcionar um efeito positivo que é o refinamento de poros da matriz em estruturas

de concreto simples, uma vez que os produtos carbonatados têm um peso molar maior que os compostos da pasta de cimento hidratada. No entanto, esse efeito não é válido para estruturas de concreto armado e protendido, pois, por possuírem aço, elas podem ser submetidas à corrosão por meio de reações químicas, desencadeadas a partir da difusão do dióxido de carbono no estado gasoso pelos poros do concreto, levando à redução do pH e o rompimento do filme passivo do aço.

Alguns autores afirmam que os concretos reforçados com fibras sintéticas reduziram a profundidade carbonatada à medida que foi aumentado os teores de fibras. Dessa maneira, Vasanelli *et al.* (2013) indicam a possibilidade de redução da profundidade carbonatada, à medida que há um maior controle de fissuras. Isso evidencia que o controle de fissuração contribui para redução das profundidades de carbonatação, devido à presença de fibras, em comparação ao concreto de referência (VASANELLI *et al.*, 2013). Essa tendência também é possível quando há adições pozolânicas na mistura, as quais podem bloquear os poros capilares e interconectados, evitando a entrada do dióxido de carbono (ZHANG; LI, 2013). Outros autores afirmam que, teores ótimos na ordem de 1,5% de fibras, tiveram uma menor profundidade de carbonatação em comparação ao concreto de referência, devido à distribuição uniforme das fibras no concreto tornou a matriz mais densa, retardando a difusão do CO₂ (MIAO; NIU; WANG, 2011).

A partir da análise desses três últimos estudos, é observada uma possibilidade de redução da profundidade carbonatada, mesmo com o aumento do teor de fibras nos compósitos. Isso é possível, pois as fibras reduzem o aparecimento de fissuras, o que dificulta a penetração do dióxido de carbono pelos poros. Dessa maneira, há melhoria na durabilidade e na vida útil de compósitos e concretos reforçados com esses tipos de fibras.

2.4.4 Migração de cloretos

A capacidade de resistir à penetração dos íons cloro é um parâmetro de grande importância quanto à durabilidade de concretos expostos a ambientes marinhos. Diversas pesquisas recentes abordaram a influência da adição de fibras poliméricas, metálicas e naturais quanto à difusão de cloretos.

Dentre as fibras sintéticas utilizadas em matrizes cimentícias, percebe-se que não um consenso quanto à facilidade ou à dificuldade de penetração de cloretos. Desse modo, concretos reforçados com fibras poliméricas facilitam o ingresso de cloretos devido à formação de um caminho preferencial pela zona de transição entre a fibra e a matriz, já que uma alteração na microestrutura na zona de transição destes concretos, causada pela adição de fibras (PEREIRA; FIGUEREDO; BAUER, 2005). Observou-se também que o aumento da relação água-cimento proporcionou um aumento dos valores dos coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário em concretos com fibras poliméricas e metálicas (ABRYCKI; ZAJDZINSKI, 2012).

Por outro lado, autores observaram que a adição de fibras de aço melhorou as propriedades mecânicas e a durabilidade destes compósitos quanto à penetração de cloretos, o que foi atribuído ao melhor controle de fissuração da matriz, uma vez que as fibras impediram a propagação de fissuras e/ou evitaram que elas se alarguem devido à natureza expansiva dos produtos de corrosão (DAWOOD; RAMLI, 2012; BERROCAL; LUNDGREN; LÖFGREN, 2016).

Diante da análise dessas pesquisas utilizando fibras sintéticas em matrizes cimentícias, é perceptível que há redução na penetração de cloretos à medida que é elevado o teor de fibras sintéticas. Isso ocorre, pois esses tipos de fibras são hidrofóbicas e controlam a abertura de fissuras, o que dificulta a entrada de cloretos. Desse modo, há melhoria na durabilidade e na vida útil de compósitos e concretos.

Quanto às fibras naturais, Sappakittipakorn e Bantia (2012) verificaram que houve aumento da penetração de cloretos em compósitos (w/c 0,55) reforçados com 0,1% e 0,3% de fibras de celulose e de polipropileno, em volume, quando comparados ao concreto de referência, porém, entre as fibras investigadas, a de celulose foi mais eficaz na fixação de cloretos que a fibra de polipropileno. Isso ocorreu, pois, os coeficientes de difusão aparente (total) foram mais altos nas amostras com fibras, provavelmente, devido à porosidade na interface fibra-matriz, entretanto, os coeficientes de difusão efetivos foram mais baixos nos concretos com o dois tipos de fibras, devido à fixação de cloretos, os quais são quimicamente combinados aos produtos de hidratação do cimento formando o sal de Friedel (SAPPAKITTIPAKORN; BANTHIA, 2012).

Ramli, Kwan e Abas (2013) constataram que, com o aumento do teor de adição de fibras de coco (0,6 a 2,4%, em massa) em compósitos cimentícios (w/agl 0,37), houve um aumento na penetração de cloretos para o interior do concreto, quando exposto ao ambiente marinho. O que também foi observado por Farooq, Saleem e Ahmad (2017) que adicionaram 0,5% de fibras de coco, em massa, e constataram aumento na movimentação de íons agressivos até o interior dos concretos reforçados com fibras com relação água-cimento de 0,5. Outra pesquisa que também analisou a penetração de cloretos em concretos reforçados por fibras vegetais, foi desenvolvida por Balasubramanian, Senthilselvan e Sabarish (2016). Esse trabalho mostrou que uma adição de 1,0% de fibras de sisal, em volume, não foi suficiente para tornar o compósito mais durável que o concreto sem fibras. Nota-se que a adição de fibras vegetais, devido à sua natureza hidrofílica, permitiu a entrada dos cloretos nas amostras, através de absorção e difusão (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013; BALASUBRAMANIAN; SENTHILSELVAN; SABARISH, 2016; FAROOQ; SALEEM; AHMAD, 2017).

Entretanto, Kumar *et al.* (2017) observaram que o teor ótimo de 0,3% fibras de sisal, em massa, adicionado ao concreto (w/c 0,48 e 0,50), contribuiu para aumento da resistência à compressão e do controle de fissuração sob condições normais e sob ataque de íons cloro. A redução da penetração de cloretos ocorreu devido ao baixo teor de fibras utilizado nesse trabalho, quando comparado às pesquisas desenvolvidas por Ramli, Kwan e Abas (2013); Balasubramanian, Senthilselvan e Sabarish (2016); e Farooq, Saleem e Ahmad (2017).

Nos estudos de Priya e Thirumalini (2018), também foi observada redução na penetração de cloretos devido à incorporação de fibras de sisal com teores, em volume, de 0,5%, 1,0% e 1,5%, principalmente para a adição de até 1,0%. A relação água/cimento utilizada nessa pesquisa foi de 0,32, o que representa uma baixa porosidade desses materiais. Assim, o teor de 1,0% de fibras proporcionou uma melhoria na densidade da matriz de concreto, devido ao preenchimento de poros, e na durabilidade, sendo este concreto classificado como de boa resistência à penetração de cloretos, de acordo com a ASTM C 1202 (ASTM, 2018).

De Gutiérrez, Díaz e Delvasto (2005) observaram a possibilidade de redução na penetração de cloretos em matrizes cimentícias quando há incorporação de materiais

cimentícios suplementares como, por exemplo, a sílica ativa e cinza volante, que contribuíram para a redução da entrada de cloretos. Para compósitos contendo 2,5% de fibras de sisal, em massa, quando comparados ao compósito sem fibras, observou-se redução na penetração de cloretos, devido ao efeito de compactação provocado pelas adições minerais, para ambas relações água-aglomerante de 0,52 e 0,64.

A partir disso, percebe-se que os efeitos positivos das adições minerais em substituição parcial ao cimento podem ser atribuídos ao aumento da densidade e redução da porosidade causada por produtos reativos que influenciam na microestrutura do material. Desse modo, a passagem de agentes deletérios como, por exemplo, os íons cloro, através das amostras, pode ser controlada, já que esses íons causam a quebra do filme passivo ao redor das armaduras.

Em relação à adição de fibras naturais em matrizes cimentícias, foi constatado que a capacidade de absorção de água pelas fibras e teores dessas fibras acima de 1% são fatores que favorecem a entrada de íons cloro. Dessa maneira, a durabilidade e na vida útil de compósitos e concretos reforçados com esses tipos de fibras podem ser comprometidas.

2.4.5 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é um parâmetro importante para compósitos reforçados com fibras curtas, pois é possível avaliar a capacidade desses materiais em conduzir corrente elétrica. Isso porque essa capacidade influencia diretamente na penetração de agentes agressivos, como por exemplo, os cloretos.

Devido à dificuldade de encontrar trabalhos referentes à resistividade elétrica em compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais, serão apresentados alguns trabalhos sobre a durabilidade de compósitos reforçados com fibras sintéticas.

Em se tratando da adição de fibras de aço nos concretos, observou-se que houve redução da resistividade elétrica desses materiais à medida que foram elevados os percentuais dessas fibras. De acordo com Fiala *et al.* (2016), foi observado que o aumento dos teores de fibras de aço, juntamente com a presença de água, criou caminhos condutores e diminuiu a resistividade elétrica. Song *et al.* (2018) afirmam que a interconexão dessas fibras nos concretos de alto desempenho (UHPFRC), é

atribuída o aumento da condutividade elétrica ao fato de a fibra de aço ser um tipo de material metálico e à quantidade de fibras gera uma rede condutora de eletricidade.

No que se refere aos concretos reforçados com fibras poliméricas, percebe-se aumento na condutividade elétrica desses compósitos. Kakooei *et al.* (2012) apontam que a adição de até 1,5% de fibras de polipropileno apresentaram maior resistividade, já que acima desse valor houve o aumento da porosidade e queda na resistividade. Söylev e Özturan (2014) observaram também aumento na condutividade elétrica dos concretos com fibras ocorreu tanto devido à elevação do teor de fibras quanto pelo aumento da relação água-cimento. Sabe-se que a resistividade do concreto diminui quando a água-relação cimento é elevada, devido ao aumento da porosidade.

Entretanto, Nili e Afroughsabet (2012b, 2012b) afirmam que o aumento da resistividade elétrica nos compósitos reforçados com fibras de aço e polimérica, à proporção que foi elevado o teor das fibras, já que a adição de 8% de sílica ativa contribuiu para diminuir o volume de poros dos concretos, o que torna esse tipo de concreto mais denso e melhora a sua durabilidade. Sendo válido apresentar que os percentuais utilizados por essas pesquisas são de no máximo 0,5%, isto é, são valores baixos comparados às pesquisas de Kakooei *et al.* (2012), Söylev e Özturan (2014), Fiala *et al.* (2016) e Song *et al.* (2018).

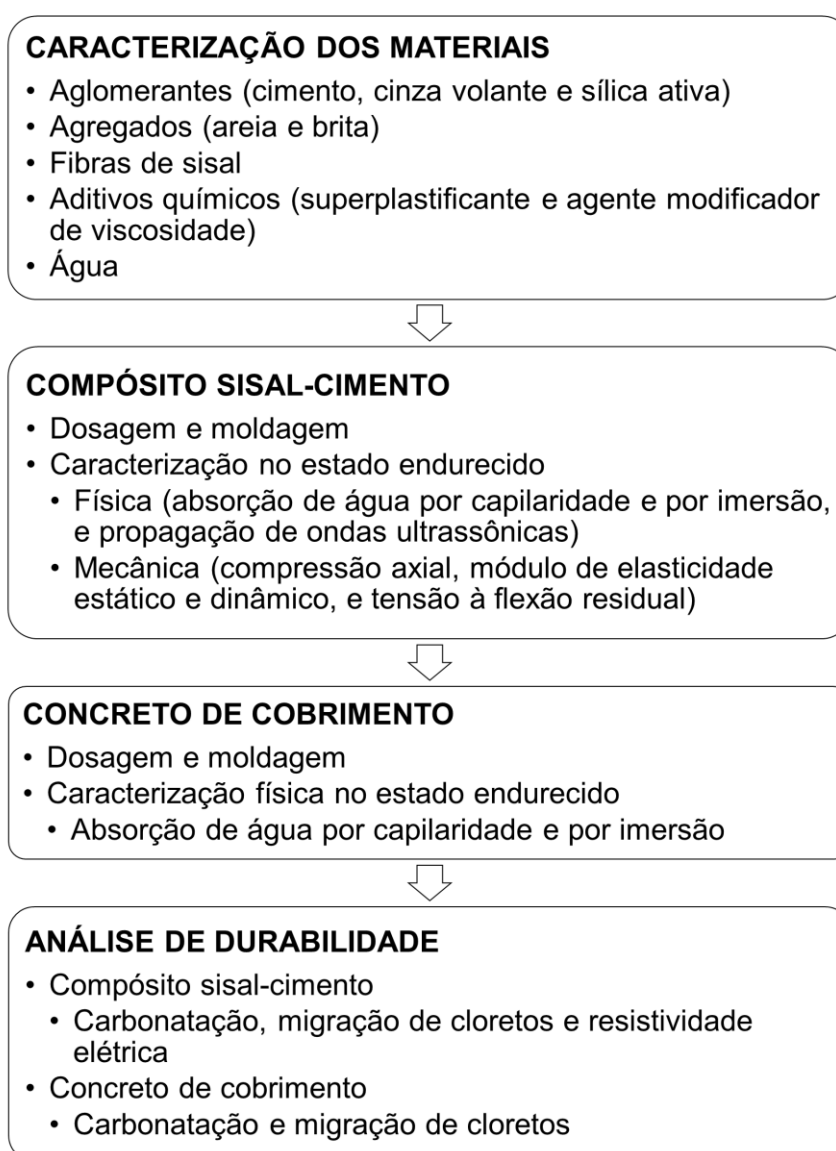
Dessa maneira, observa-se que há uma tendência na literatura acerca da redução da resistividade elétrica em concretos à medida que são elevados os percentuais de fibras curtas sintéticas, exceto para os concretos com fibras que utilizem alguma adição pozolânica. Essa redução da resistividade elétrica implica diretamente na diminuição da durabilidade das estruturas de concreto armado, principalmente quando essa propriedade tem relação com a aumento da porosidade.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O diagrama das etapas do programa experimental é apresentado na

Figura 18 e tem o propósito de dar continuidade à pesquisa desenvolvida por Leite (2019), a fim de avaliar os parâmetros de durabilidade das fôrmas permanentes moldadas em compósitos-sisal pelo autor para a produção de vigas de concreto armado.

Figura 18 - Diagrama do programa experimental.



Fonte: (O AUTOR).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Aglomerantes

Os aglomerantes usados foram cimento, sílica ativa e cinza volante. O cimento Portland utilizado na confecção dos compósitos e do concreto foi o CP-V ARI RS (alta resistência inicial e resistente a sulfatos), da marca Mizu, que é usado frequentemente em elementos pré-fabricados, pois, devido à sua elevada finura, é mais reativo, além de não possuir adições pozolânicas.

A sílica ativa utilizada neste trabalho foi gerada e fornecida pela Companhia de Ferro-ligas da Bahia (FERBASA), localizada no município de Pojuca (BA). A cinza volante, foi fornecida pelo fabricante *Pozo Fly*, localizada no município de Capivari de Baixo (SC). Essas adições minerais foram utilizadas com o intuito de reduzir o consumo de cimento, contribuir para o refinamento de poros e, em especial, a cinza volante, por ser rica em aluminatos, contribui para a redução da entrada de agentes agressivos nas matrizes cimentícias.

As massas específicas do cimento, da sílica ativa e da cinza volante foram determinadas por meio de picnometria a gás hélio, utilizando um picnômetro AccuPyc II, Micromeritics. As áreas superficiais do cimento, da sílica ativa e da cinza volante foram obtidas por meio do método BET (BRUNAUER; EMMETT; TELLER) que se baseia na adsorção de gases e é mais adequado para aferição desse parâmetro, pois, é capaz de aferir elevados valores de área superficial específica. Para isso, utilizou-se um analisador de área superficial e porosidade da marca Micromeritics, modelo Gemini VII, em que foram colocadas nesse equipamento: 1,37g (cimento), 0,56g (cinza volante) e 0,22g (sílica ativa), devido à diferença de densidade de cada material. As amostras dos aglomerantes foram submetidas à pressão de 17 psi, exercida pelo nitrogênio gasoso.

A Tabela 5 apresenta as principais características físicas das matérias-primas que compõem o aglomerante utilizado nas misturas F0, F2, F4 e F6 deste trabalho.

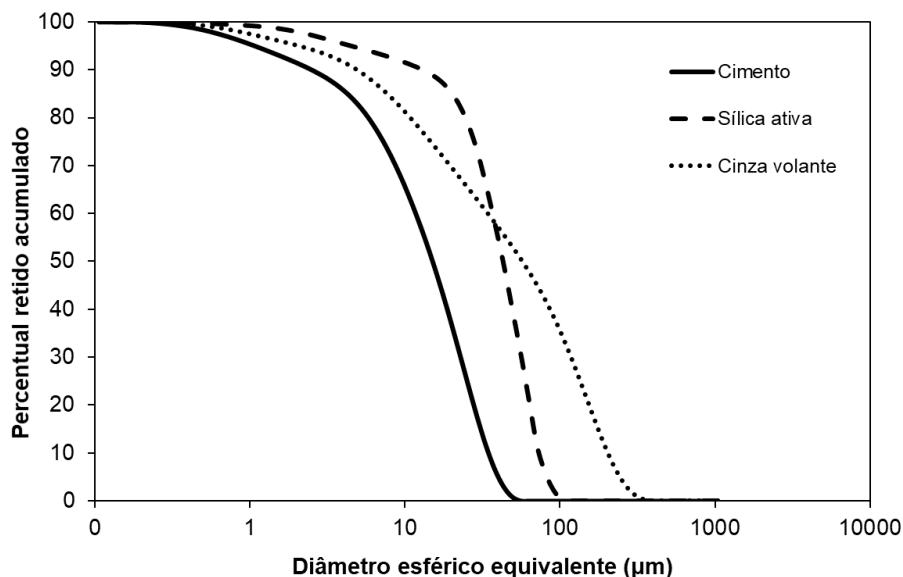
Tabela 5 - Características físicas do cimento, sílica ativa, cinza volante.

Característica	Cimento	Sílica ativa	Cinza volante
Superfície específica BET (m ² /g)	1,36	15,15	0,76
Massa específica (g/cm ³)	3,14	2,32	2,15
Diâmetro esférico equivalente (D ₁₀) (µm)	33,15	71,31	198,00
Diâmetro esférico equivalente (D ₅₀) (µm)	15,41	42,79	55,24
Diâmetro esférico equivalente (D ₉₀) (µm)	2,27	11,94	4,89

Fonte: (O AUTOR).

Conforme a Figura 19, o cimento, a sílica ativa e a cinza volante foram caracterizadas utilizando um granulômetro a laser *Mastersizer 3000E* da marca Malvern, com faixa de detecção entre 0,1 a 1000 µm, com dispersão em meio líquido, em que o dispersante (água) possui o índice de refração igual a 1,33. Esses ensaios foram realizados nos Laboratórios de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana (LABOTEC).

Figura 19 - Distribuição dos tamanhos de partícula do cimento, da sílica ativa e da cinza volante.



Fonte: (O AUTOR).

A composição química do cimento, sílica ativa e cinza volante foi determinada por meio da técnica de espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX). O equipamento utilizado foi o FRX S2 Ranger da marca BRUKER situado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) do Instituto Federal da Bahia (IFBA). A Tabela

6 apresenta a composição química das matérias-primas que compõem o aglomerante, determinada pela técnica de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 6 - Composição química principal do cimento, sílica ativa, cinza volante.

Material	Cimento	Sílica ativa	Cinza volante
SiO₂	16,18	85,51	56,61
Al₂O₃	3,76	1,47	27,15
Fe₂O₃	3,77	5,13	6,27
CaO	64,28	0,30	1,58
MgO	4,90	1,40	1,70
K₂O	1,05	1,90	3,11
SO₃	4,83	0,53	0,64
Na₂O	0,60	2,10	1,10
Outros	0,63	1,66	1,84

Fonte: (O AUTOR).

3.1.2 Agregados

A areia (agregado miúdo) de origem quartzosa usada neste estudo foi proveniente de jazida localizada no município de Alagoinhas, situado no Estado da Bahia. Esse material foi peneirado, a fim de serem utilizadas somente partículas inferiores a 1,2 mm, devido à influência da granulometria do agregado miúdo na dispersão e no comportamento das fibras em compósitos cimentícios segundo Magalhães *et al.* (2014).

O agregado graúdo (brita) utilizado na confecção das amostras de concreto, que representam a viga, foi de origem basáltica, proveniente do município de Conceição do Jacuípe-BA.

As massas específicas dos agregados miúdo e graúdo foram determinadas conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009a) e a NBR NM 53 (ABNT, 2009b). A granulometria dos agregados miúdo e graúdo foi determinada por peneiramento manual, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com a determinação do módulo de finura desses materiais.

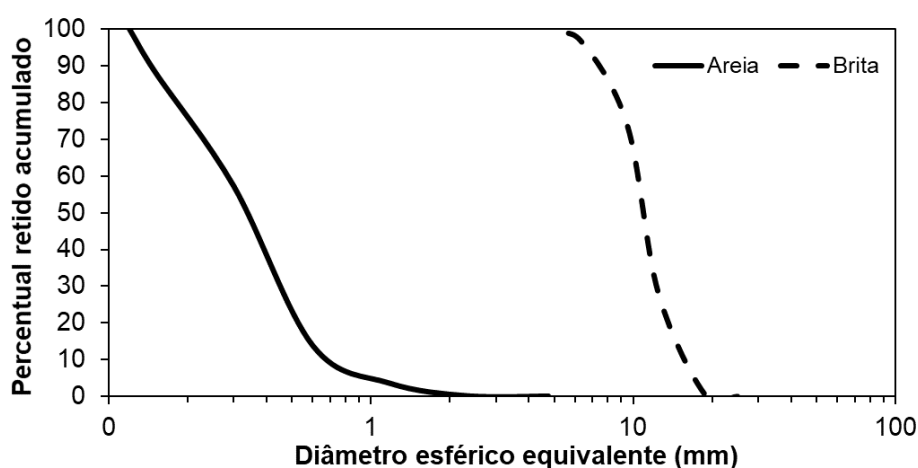
A Tabela 7 apresenta as principais características físicas dos agregados miúdo (areia usada nas amostras F0, F2, F4, F6 e CC) e graúdo (brita utilizada apenas no concreto de cobrimento), e a Figura 20 mostra as distribuições granulométricas dos agregados.

Tabela 7 - Características físicas da areia e da brita.

Característica	Areia	Brita
Massa específica (g/cm ³)	2,61	2,79
Dimensão máxima do agregado (mm)	1,20	19,00
Módulo de finura	1,64	-

Fonte: (O AUTOR).

Figura 20 - Distribuição dos tamanhos de partícula da areia e da brita.



Fonte: (O AUTOR).

3.1.3 Fibras de sisal

As fibras de sisal foram obtidas no município de Valente, região semiárida baiana. Conforme a Figura 21A, no momento da aquisição das fibras de sisal (saco de 50 kg), foi necessário separá-las em lotes de aproximadamente 5 kg e, posteriormente, realizar processo de lavagem inicial de cada lote de fibras durante 10 minutos em água a 50 °C, a fim de retirar a mucilagem, que são resíduos oriundos de sua extração, conforme mostrado na Figura 21B, e posteriormente, lavar em água corrente (SANTOS, 2014; SANTOS; FONTES; LIMA, 2017; LEITE, 2019).

Devido à quantidade de fibra por lote, foi preciso utilizar um suporte metálico para prender as fibras durante os ciclos sucessivos de molhagem e secagem e diminuir a tendência dos fios embarçarem entre si, conforme pode ser visualizado na Figura 21C.

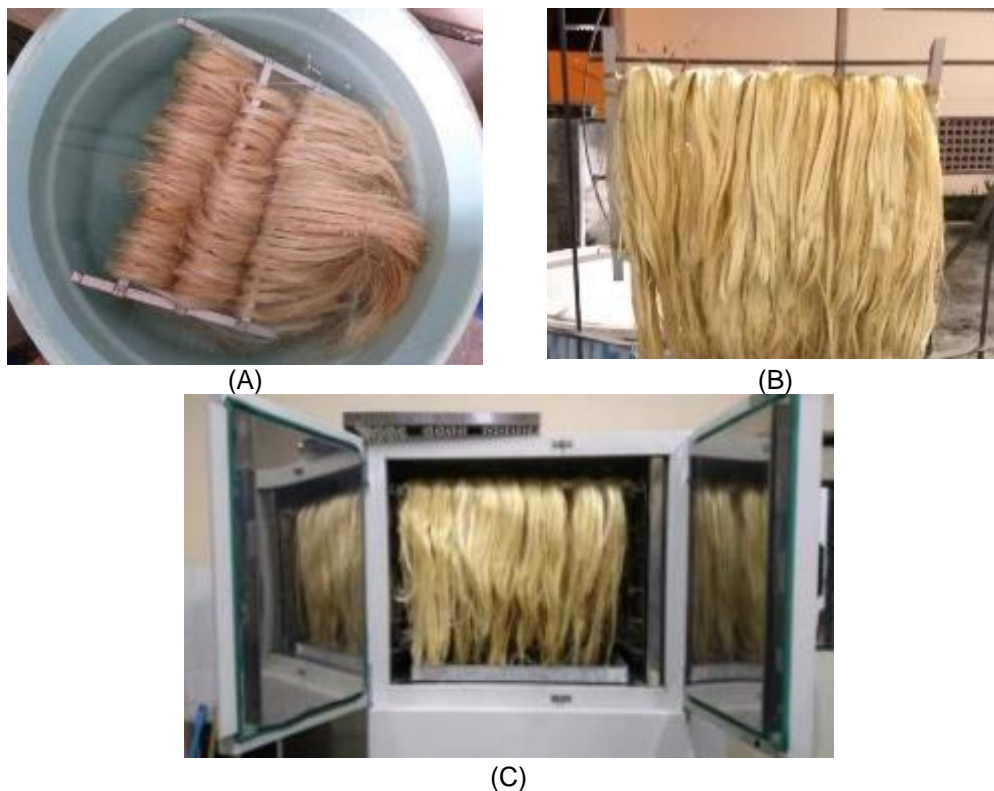
Figura 21 - (A) Aquisição e separação das fibras em lotes, (B) lavagem das fibras em água a 50 °C e (C) exposição das fibras presas em suporte metálico.



Fonte: (O AUTOR).

Em seguida, foram realizados cinco ciclos de hornificação, utilizando o procedimento empregado por Ferreira *et al.* (2012), que consiste em imergir as fibras em água à temperatura ambiente durante 3 horas, a fim de saturá-las completamente, diminuindo assim sua variação volumétrica (Figura 22A). Posteriormente, as fibras foram expostas ao ar livre durante 10 minutos (Figura 22B). A secagem em estufa foi realizada a uma temperatura de 80 °C por 16 horas em estufa (Figura 22C). O aquecimento e o resfriamento da estufa foram programados, a uma taxa de 1 °C/min, com o intuito de evitar choque térmico.

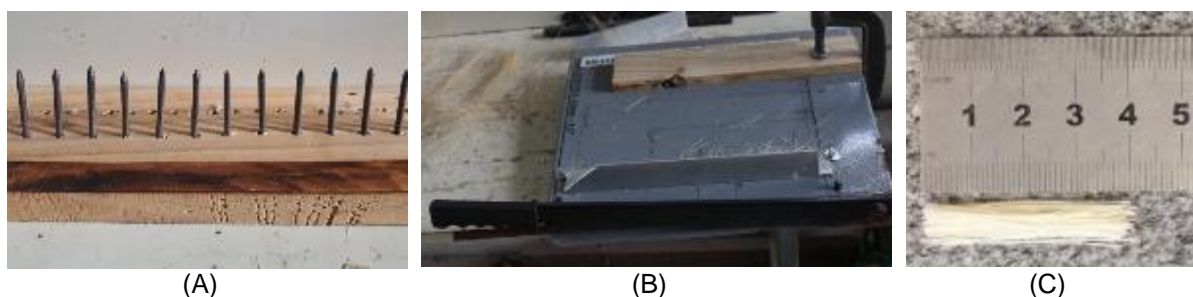
Figura 22 - (A) Imersão das fibras em água, (B) retirada de excesso de umidade e (C) secagem em estufa.



Fonte: (O AUTOR).

Ao término dos ciclos de hornificação, as fibras de sisal precisaram ser desembaraçadas usando um pente de pregos com espaçamentos entre eles de 1,5 cm (Figura 23A), e cortadas, usando uma guilhotina com anteparo fixo (Figura 23B), em comprimentos médios de 40 mm, aferidos com auxílio de uma régua de precisão 0,5 mm (Figura 23C). O comprimento das fibras curtas de sisal adotado nessa pesquisa foi devido à capacidade portante durante os ensaios de flexão que os elementos construtivos desenvolvidos por Roque (2015) e Leite (2019).

Figura 23 - (A) Pente de pregos; (B) guilhotina; (C) fibra cortada com 40mm.



Fonte: (O AUTOR).

Após fibras serem cortadas, estas foram estocadas em recipientes plásticos até o instante das suas utilizações. A Tabela 8 apresenta as características físicas das fibras de sisal utilizadas nas matrizes cimentícias deste trabalho, de acordo com Roque (2015) e Leite (2019).

Tabela 8 - Características físicas da fibra de sisal.

Característica	Valor de referência
Massa específica aparente (g/cm ³)	0,90
Teor de umidade inicial (%)	13,35

Fonte: (ROQUE, 2015; LEITE, 2019).

3.1.4 Aditivos químicos

A fim de melhorar a trabalhabilidade do compósito, utilizou-se o aditivo superplastificante MC-Powerflow 1108®, à base de policarboxiletos, com densidade de 1,09 g/cm³ e teor de sólidos igual a 30%, de acordo com fabricante MC-BAUCHIMIE®, e apresenta-se em forma líquida e cor marrom.

Foi utilizado, também, o agente modificador de viscosidade (VMA) Rheomac® UW 410, à base de polímero de alto peso molecular, fabricado pela BASF®, a fim de evitar a exsudação e a segregação e manter a coesão do compósito. Esse produto é composto por uma base química de polímeros de celulose, com alto peso molecular, apresenta-se em forma de pó com cor branca e massa específica real variando entre 0,68 e 0,72 g/cm³, conforme o fabricante.

3.1.5 Água

A água utilizada teve origem da rede de abastecimento, proveniente de poço, na Universidade Estadual de Feira de Santana. Além disso, a fim de elaborar algumas soluções, foi utilizada água destilada e deionizada em laboratório.

3.2 COMPÓSITO SISAL-CIMENTO

3.2.1 Dosagem e moldagem

A proporção das matérias-primas utilizadas nos compósitos dessa pesquisa, foi obtida a partir dos trabalhos desenvolvidos por Ferreira *et al.* (2012), Santos (2014), Roque (2015), Lima *et al.* (2017), Lima *et al.* (2018) e Leite (2019). Devido à variação dos percentuais de fibras na matriz cimentícia, em massa, foram mantidas as relações água-aglomerante (0,40) e aglomerante-areia (1:1) para as misturas F0, F2, F4 e F6, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Traços unitários para as misturas F0, F2, F4 e F6.

Traço unitário em massa	Cimento	CV	SA	A	X	F	SP	VMA
F0	0,45	0,40	0,15	1,00	0,40	-	0,50%	0,25%
F2	0,45	0,40	0,15	1,00	0,40	2,00%	0,50%	0,25%
F4	0,45	0,40	0,15	1,00	0,40	4,00%	0,50%	0,15%
F6	0,45	0,40	0,15	1,00	0,40	6,00%	1,15%	0,15%

Nota: CV (cinza volante); SA (sílica ativa); A (areia); X (relação água/aglomerante); F (fibra de sisal); SP (aditivo superplastificante); VMA (aditivo modificador de viscosidade).

Fonte: (O AUTOR).

A Tabela 10 representa os traços unitários e consumo de materiais (kg) para 1 m³, adotados nessa pesquisa, das misturas F0, F2, F4 e F6. Os dados das Tabela 9 e Tabela 10 permitiram a fixação do espalhamento, conforme a Figura 24.

Tabela 10 - Consumos de materiais, por m³, para as misturas F0, F2, F4 e F6.

Consumo (kg/m ³)	Cimento	CV	SA	A	W	F	SP	VMA
F0	382,28	339,80	127,43	849,51	329,89	-	14,16	2,12
F2	375,19	333,51	125,06	833,77	329,34	11,12	13,90	2,08
F4	368,37	327,44	122,79	818,60	328,80	21,83	13,64	1,23
F6	361,79	321,59	120,60	803,97	316,09	32,16	30,82	1,21

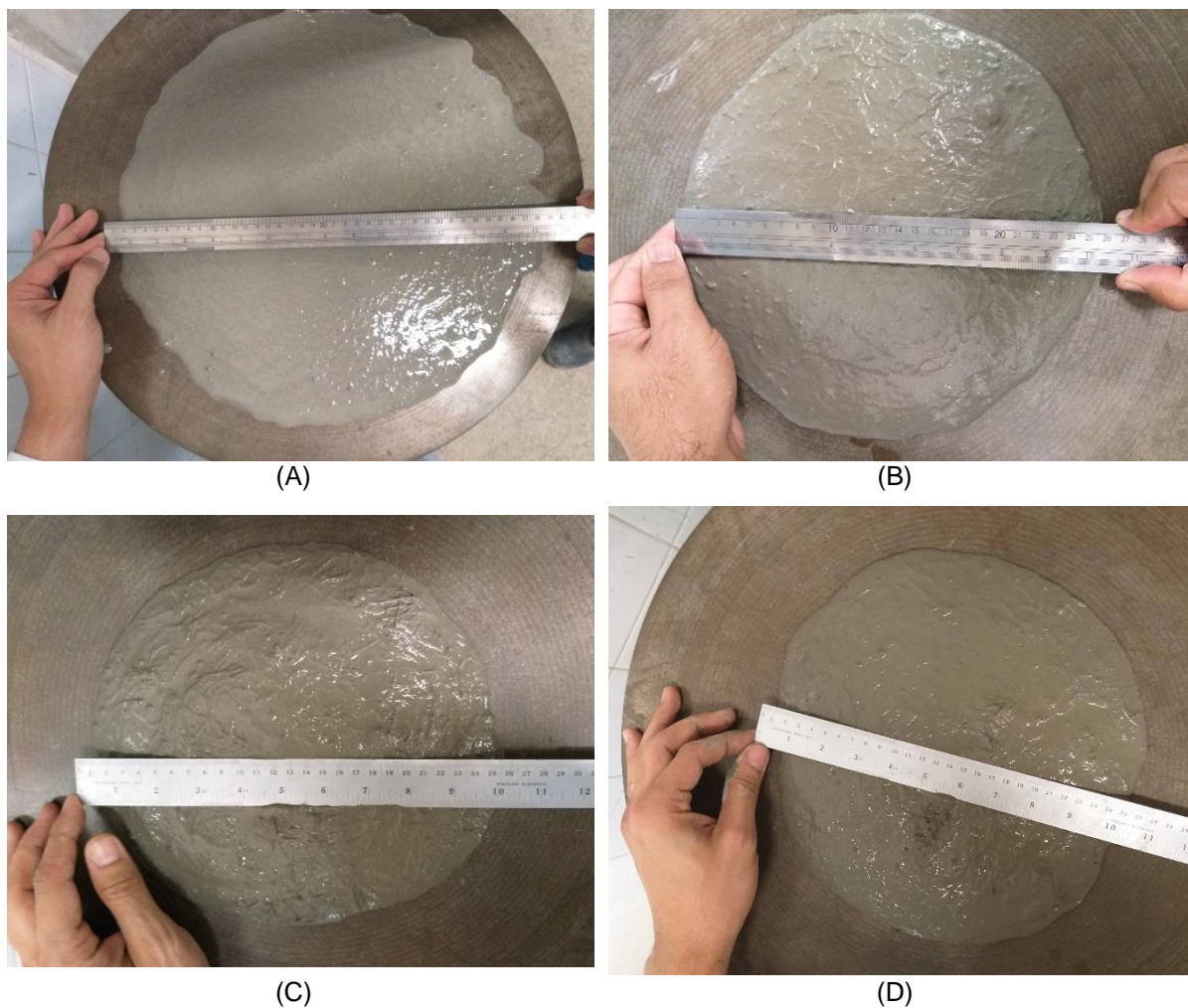
Nota: CV (cinza volante); SA (sílica ativa); A (areia); W (água); F (fibra de sisal); SP (aditivo superplastificante); VMA (aditivo modificador de viscosidade).

Fonte: (O AUTOR).

Para os compósitos se tornarem adensáveis e permitirem a moldagem das misturas, o espalhamento medido na mesa para índice de consistência em relação à matriz de argamassa autoadensável (F0) foi de 400 ± 10 mm (sem golpes) e aos compósitos, após a adição das fibras (F2, F4 e F6), foi fixado em 270 ± 10 mm, com

aplicação de golpes, segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016) (Figura 24). Esse valor de espalhamento também foi alcançado a partir do ajuste nos teores de aditivos químicos (superplastificante e agente modificador de viscosidade).

Figura 24 - Espalhamento *flow table* dos compósitos (A) F0, (B) F2, (C) F4 e (D) F6.



Fonte: (O AUTOR).

Para produzir o compósito, utilizou-se uma betoneira com capacidade para 145 litros e a sequência de mistura dos componentes do compósito foi baseada no trabalho desenvolvido por Leite (2019), conforme a Tabela 11.

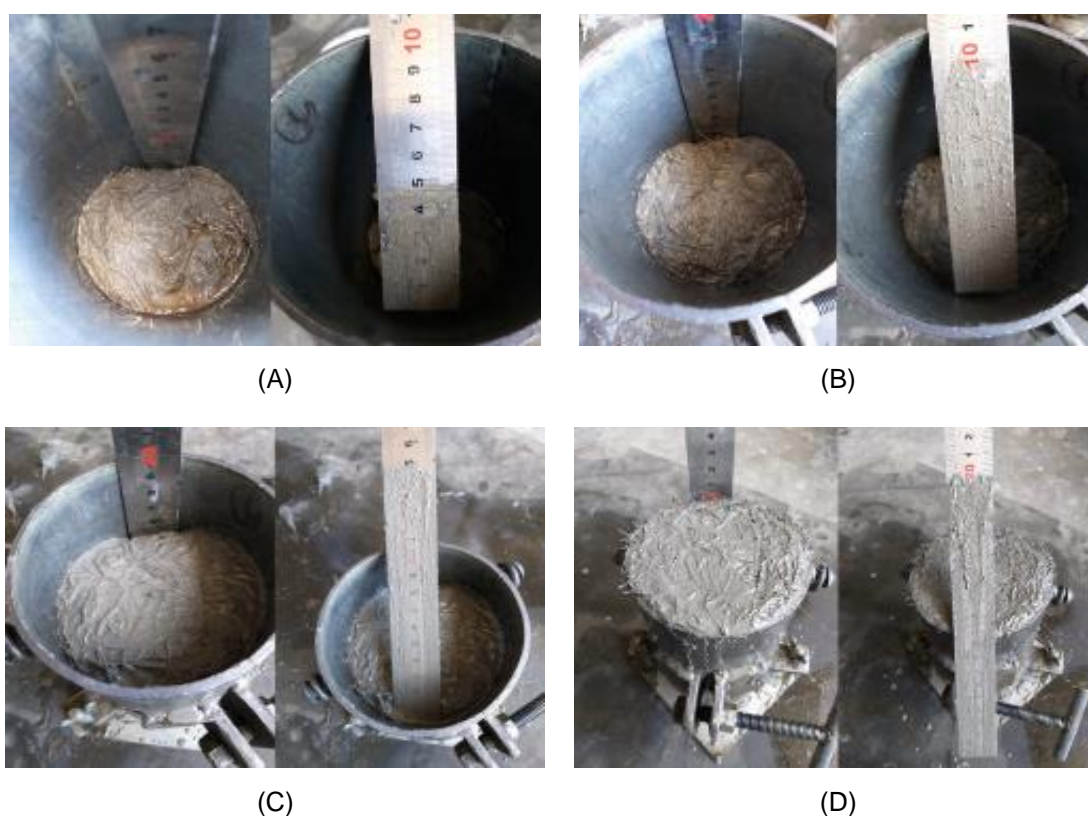
Tabela 11 - Etapas e os tempos de mistura para produção dos compósitos.

Etapa	Tempo (min)	Descrição da etapa
1	1	Imprimação com cimento, areia e água (traço 1 : 2 : 0,8)
2	1	Adicionar cimento, cinza volante, água e aditivo superplastificante
3	1	Pausa para a limpeza da betoneira
4	5	Adicionar areia e sílica ativa
5	10	Adicionar as fibras
6	2	Adicionar o VMA

Fonte: (O AUTOR).

A Figura 25 apresenta as etapas de moldagem e adensamento dos compósitos.

Figura 25 - Moldagem das misturas em quatro camadas sucessivas com 5cm de altura, cada.



Fonte: (O AUTOR).

De acordo com a Figura 25, a moldagem e o adensamento dos corpos de prova cilíndricos foram realizados em 4 camadas de alturas iguais a 50 mm, a fim de promover o alinhamento preferencial das fibras na direção transversal ao eixo do cilindro, o que se assemelha à mesma orientação das fibras na fôrma permanente para vigas de

concreto armado desenvolvida por Leite (2019). Para garantir a uniformidade na altura das camadas, o compósito no estado fresco foi inicialmente medido em um recipiente plástico, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura, e depois lançado no molde metálico. Após o lançamento, cada camada foi adensada por vibração externa em uma mesa vibratória.

3.2.2 Caracterização física no estado endurecido

A execução do ensaio de absorção de água por imersão foi realizada conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009) e está representada na Figura 26. Para isso, foram usados três corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para cada mistura aos 28 dias de idade, em que estes foram secos em estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, durante 72 h, e posteriormente foram imersos em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante 72 h.

Figura 26 - Execução do ensaio de absorção de água por imersão: determinação (A) da massa imersa e (B) da massa seca e saturada.



Fonte: (O AUTOR)

A partir disso, determinaram-se os valores de absorção (Equação 15), de índice de vazios (Equação 16) e de massas específicas seca ou aparente (Equação 17).

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (15)$$

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \cdot 100 \quad (16)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (17)$$

Em que: A é a absorção (%), M_{sat} é a massa saturada em água após imersão (g), M_s é a massa seca em estufa (g), I_v é o índice de vazios (%), M_i é a massa saturada imersa em água (g), ρ_s é a massa específica seca ou aparente (g).

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012). Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para cada mistura analisada, aos 28 dias de idade. Inicialmente, estes corpos de prova foram colocados em estufa, à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, até que se atingisse constância de massa. Ao serem retirados da estufa, os corpos de prova foram resfriados em ambiente controlado à temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, e sua massa seca (M_s) foi determinada. As misturas foram colocadas em um recipiente com nível de água que permaneceu em (5 ± 1) mm de altura, em relação à sua face inferior. As amostras tiveram as suas faces laterais seladas com filme de poli cloreto de vinila para garantir o fluxo unidirecional e evitar perda de umidade.

Durante o ensaio foi verificada a massa dos corpos de prova em intervalos de tempo predefinidos até a saturação da amostra, obtendo-se, assim, a massa saturada (M_{sat}), que significa uma adaptação da metodologia considerada pela NBR 9779 (ABNT, 2012). Com isso, a absorção de água por capilaridade C em cada medida, expressa em g/cm^2 , é calculada com o auxílio da Equação 18, em que S representa a área da seção transversal do corpo de prova, expressa em cm^2 .

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{S} \quad (18)$$

O índice de absorção de água por capilaridade por unidade de área (i), em materiais porosos, avalia a absorção de água pela raiz quadrada do tempo de medida (t). Essa curva é expressada pela Equação 19, em que S representa a absorvidade ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$) e C_t é uma constante experimental (HALL; TSE, 1986).

$$i = S \cdot t^{0,5} + C_t \quad (19)$$

Segundo Zega e Di Maio (2011), o parâmetro experimental (C) que é igual a zero quando quatro condições básicas são atendidas: material homogêneo; o fluxo de absorção por capilaridade deve ser perpendicular à face de exposta à água; a água livre e disponível; o efeito da gravidade não deve ser preponderante durante o ensaio de absorção capilar. Nesse caso, a relação entre i e $t^{0,5}$ é linear e a absorptividade pode ser encontrada pela inclinação da reta.

Entretanto, neste estudo, a relação entre i e $t^{0,5}$ não é linear e a absorptividade foi obtida pelo ajuste da Equação 19 com a curva experimental para cada uma das amostras analisadas, já que há efeito da gravidade nas amostras analisadas (HALL; TSE, 1986; SANTOS; FONTES; LIMA, 2017). De acordo com Hall (1989), existe também uma relação entre a porosidade acessível à água e a capacidade de penetração do líquido num sólido poroso, que é denominada de índice de desempenho (ID) do material, conforme a Equação 20.

$$ID = \frac{1-\phi}{S} \quad (20)$$

Em que ϕ representa a porosidade do material obtida no ensaio de absorção de água por imersão e S é a absorptividade encontrada por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Além dos ensaios de absorção de água, a técnica de propagação de onda ultrassônica foi utilizada, nessa pesquisa, para caracterização física dos compósitos no estado endurecido. Esse método verifica a homogeneidade de um material poroso como, por exemplo, o de matriz cimentícia, em que é possível detectar prováveis falhas de concretagem, existência e profundidade de fissuras, bem como regiões de alta e baixa qualidade da amostra (PEREIRA; MEDEIROS, 2012). É também utilizado como parâmetro de verificação das variações do material no tempo, ou seja, aquelas relacionadas à agressividade ambiental.

As características de qualidade do concreto medidas por meio desta técnica, não-destrutiva, a partir do monitoramento das estruturas e da estimativa de sua resistência medida em campo, levam à dedução das informações sobre a corrosão das armaduras as quais são obtidas de maneira indireta (PEREIRA; MEDEIROS, 2012).

A norma inglesa BS EN12504-4 (BS, 2004) estabelece os procedimentos para executar essa técnica e fornece uma tabela que relaciona os critérios de qualidade do concreto, a partir dos valores de velocidade longitudinal da onda ultrassônica, segundo a Tabela 12.

Tabela 12 - Critérios de avaliação do concreto com base na velocidade de onda ultrassônica, segundo BS (2004).

Velocidade longitudinal da onda (km/s)	Qualidade do concreto
$v < 2$	Muito fraca
$2 < v < 3$	Fraca
$3 < v < 3,5$	Média
$3,5 < v < 4$	Boa
$4 < v < 4,5$	Muito Boa
$v > 4,5$	Excelente

Fonte: (Adaptado de BS, 2004).

Além disso, o ensaio ultrassônico permite avaliar a qualidade do concreto, a partir da análise do módulo de elasticidade dinâmico que corresponde a uma medida indireta para caracterizar mecanicamente os concretos (RIBEIRO *et al.*, 2018).

O ensaio de ultrassom foi executado conforme a NBR 8802 (ABNT, 2019). Para isso, foram moldados três corpos de prova cilíndricos para cada teor de fibras, com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Os corpos de prova ficaram em cura submersa até o momento do ensaio, que foi realizado aos 28 dias de idade.

A velocidade de propagação de pulso ultrassônico é calculada por meio da Equação 21 (ABNT, 2019; BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

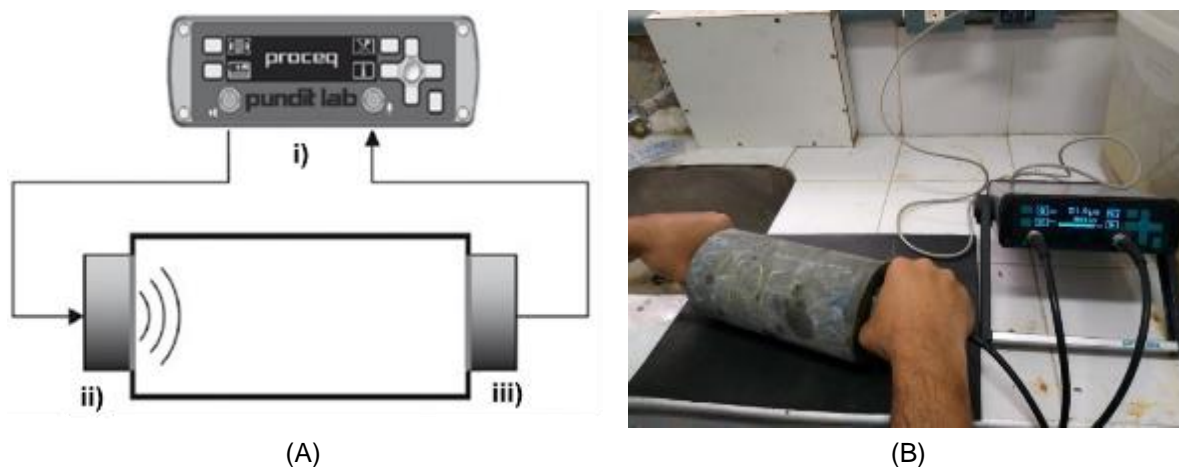
$$v = \frac{L}{t} \quad (21)$$

Em que v é a velocidade de propagação da onda (mm/ μ s); L é o comprimento do corpo de prova (mm); e t o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso (μ s).

O equipamento utilizado neste estudo (Pundit Lab, da Proceq) é constituído de: uma unidade central (i), que possui um gerador de pulsos elétricos, um amplificador e

um dispositivo eletrônico para medição do tempo que o pulso ultrassônico leva para atravessar o corpo de prova; um transdutor emissor (ii); e um receptor (iii), conforme mostrado na Figura 27A. Esse equipamento possui transdutores de 54kHz, cuja emissão e recepção das ondas ultrassônicas foram realizadas, respectivamente, pelo transdutor emissor e o receptor, os quais foram colocados nas superfícies opostas do corpo de prova (Figura 27B).

Figura 27 - (A) Equipamento de determinação da velocidade de onda ultrassônica Pundit Lab e (B) realização do ensaio.



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018; O AUTOR).

3.2.3 Caracterização mecânica no estado endurecido

Para o ensaio de resistência à compressão axial foram utilizados, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007), corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm. Assim, foram moldados três corpos de prova de cada teor de fibras aos 28 dias de idade, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007).

Nas mesmas condições de realização do ensaio de resistência à compressão axial, também foi determinado para os compósitos o módulo de elasticidade estático conforme NBR 8522 (ABNT, 2017). Esses ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica servocontrolada, da marca Contenco, modelo HD-120T, com taxa de incremento de tensão de 0,45 MPa por segundo.

A fim de determinar o módulo de elasticidade dinâmico, fez-se necessário usar os dados de velocidade de propagação de pulso ultrassônico provenientes de três corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de idade, de acordo com a NBR 15630 (ABNT, 2008). As equações utilizadas para obter esse parâmetro foram encontradas na NBR 15630 (ABNT, 2008), Equação 22, e na ASTM C597-09 (ASTM, 2016), Equação 23.

$$E_d = \rho \cdot V^2 \cdot K \quad (22)$$

$$K = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{1-\nu} \quad (23)$$

Em que: V é a velocidade de propagação da onda (km/s); E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (GPa); K é o coeficiente, determinado por meio do coeficiente de Poisson (para concreto, ν é igual a 0,2, logo K vale 0,9); e ρ a massa específica aparente do material no estado endurecido (kg/m³).

Também foi avaliada a resistência à fratura ou ensaio de flexão de três pontos, que determina a tensão à flexão residual, em três corpos de prova, para cada mistura (F0, F2, F4 e F6), aos 28 dias de idade. Esse ensaio foi realizado conforme o método normatizado pela RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2002), em que são determinadas as tensões residuais as quais se referem à capacidade do compósito resistir em diferentes níveis de abertura da fissura, e essas tensões são calculadas pela Equação 24. O limite de proporcionalidade é determinado pela Equação 25, que representa a deformação no regime elástico até a primeira abertura de fissura.

$$f_{R,i} = \frac{3 \cdot F_{R,i} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (24)$$

$$f_{fct,L} = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (25)$$

Em que: $f_{R,i}$ são as tensões residuais e $f_{fct,L}$ é o limite de proporcionalidade (MPa); $F_{R,i}$ são as cargas relativas às aberturas de fissuras ($CMOD_j$) e F_L é igual ao valor mais alto de carga até a primeira fissura (N); L é a distância entre apoios (mm); b é o lado da seção transversal (150 mm) e h_{sp} é a altura útil do prisma (125 mm) (RILEM, 2002).

As Equações 26 e 27 representam as tensões equivalentes (RILEM, 2002).

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{D_{BZ,2}^f}{0,50} \right) \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (26)$$

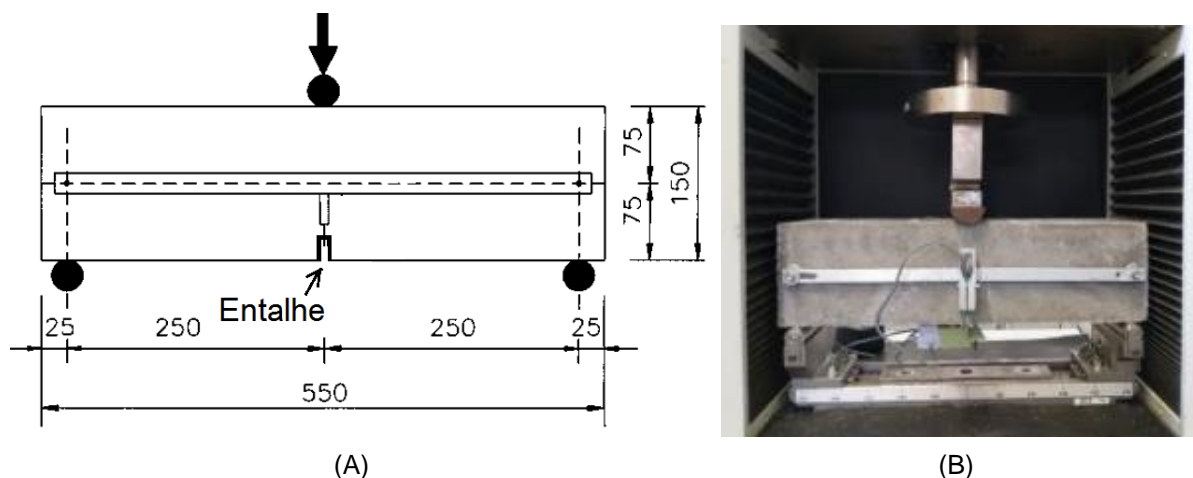
$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{D_{BZ,3}^f}{2,50} \right) \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (27)$$

Em que $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$, em N, correspondem às parcelas de energia absorvida proporcionadas pelo reforço das fibras e essas parcelas têm relação com as tensões equivalentes $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, em MPa, respectivamente; L é a distância entre apoios (mm); b é o lado da seção transversal (150 mm) e h_{sp} é a altura útil do prisma (125 mm) (RILEM, 2002).

As amostras utilizadas no ensaio de fratura possuíam largura de 150 mm, altura de 150 mm, comprimento de 550 mm e entalhe na face inferior com 25 mm de profundidade, para aplicar uma carga concentrada no centro da viga e induzir a abertura de fissura, de acordo com Figura 28A.

A RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2002) sugere que, a partir da curva carga em função da abertura de fissura também são determinadas as tensões equivalentes (Equações 26 e 27) e, conseqüentemente, é avaliada a tenacidade do compósito reforçado com fibras. Para tal, o deslocamento da amostra precisa ser controlado a uma taxa de velocidade igual a 0,2 mm/min. Esse deslocamento foi medido por meio de dois LVDTs (transdutor para medição de deslocamento linear) de 50 mm que foram instalados: um na face oposta à aplicação de carga (*CMOD*) e outro na face frontal do prisma (w), conforme a Figura 28B (RILEM, 2002; QUININO, 2015; LEITE, 2019). Esses transdutores possuem as finalidades de medir a abertura de fissura do prisma (*CMOD*); e para medir o deslocamento vertical (w), ambos foram presos por parafusos – com arruelas e roscas – os quais foram afixados com uso de uma resina epóxi (QUININO, 2015; LEITE, 2019). A célula de carga empregada no ensaio tem capacidade de 5 tf.

Figura 28 - (A) Esquema de preparação do ensaio de fratura; (B) execução do ensaio de fratura.



Fonte: (LEITE, 2019; O AUTOR).

Foi realizada uma adaptação no ensaio normatizado pela RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2002), no que se refere à distância máxima da extremidade inferior dos prismas ensaiados até o *LVDT*, que faz a medição da abertura da fissura, sendo necessária a correção dos valores encontrados. Leite (2019) também fez essa adaptação no ensaio de fratura, além de executá-lo com amostras extraídas da fôrma permanente. Para a realização deste ensaio, as informações de carga e deslocamento foram medidas através de um sistema de aquisição constituído de uma placa Arduino associada com o *software* Supervitec, que analisava os dados enviados pela placa a cada segundo. Esse ensaio foi realizado em uma máquina universal Autograph AGS-X da marca Shimadzu, com capacidade de 100 kN, conforme visualizado na Figura 28B.

Para classificar a resistência pós-fissuração dos compósitos reforçados com fibras, os parâmetros sugeridos pela norma CEB-FIP 2010 (CEB-FIP, 2011) estão relacionados com as tensões residuais à flexão ($f_{R,1}$) (estado limite de serviço) e ($f_{R,3}$) (estado limite último) para fins de aplicações estruturais. Os parâmetros utilizados foram: $f_{R,1}$ que representa o intervalo de tensão e uma letra (a, b, c, d ou e) que representa a razão entre $f_{R,3}$ e $f_{R,1}$. O intervalo de tensão é definido por dois números subsequentes nas séries: 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0,... (MPa) enquanto as letras a, b, c, d, e correspondem ao índice de tensão residual, conforme a Tabela 13. O tipo de fibra que foi utilizado como reforço da matriz cimentícia também deve seguir os seguintes parâmetros: $f_{R,1}/f_L > 0,4$ e $f_{R,3}/f_{R,1} > 0,5$ (CEB-FIP, 2011).

Tabela 13 - Classificação do compósito reforçado com fibras para fins estruturais com base nas tensões residuais, conforme CEB-FIP (2011).

Índice de tensão residual	Razão entre $f_{R,3}$ e $f_{R,1}$
a	$0,5 < f_{R,3}/f_{R,1} < 0,7$
b	$0,7 \leq f_{R,3}/f_{R,1} < 0,9$
c	$0,9 \leq f_{R,3}/f_{R,1} < 1,1$
d	$1,1 \leq f_{R,3}/f_{R,1} < 1,3$
e	$1,3 \leq f_{R,3}/f_{R,1}$

Fonte: (O AUTOR).

Além disso, a fim de analisar o quanto os compósitos absorvem energia até a ruptura, o índice de tenacidade (I_{20}) foi calculado conforme a norma ASTM C1018 (ASTM, 1997). Esse índice corresponde à razão entre a área sob as curvas (tensão-deformação) limitadas à área correspondente a 10,5 vezes à deformação de primeira fissura e 1 vez essa deformação. O cálculo das áreas foi realizado com o *software* Origin Pro, versão 8.1.

3.3 CONCRETO DE COBRIMENTO

A utilização da fôrma permanente para produção de vigas de concreto armado muitas vezes provoca a substituição da camada de cobrimento de concreto por outro material, no caso desse trabalho, o compósito sisal-cimento. Dessa forma, é importante verificar se as propriedades deste material compósito são equivalentes ou não ao concreto de cobrimento e se ele consegue garantir a mesma proteção das barras de aço.

Desse modo, foram avaliadas nesse trabalho as propriedades físicas e de durabilidade de um concreto usualmente utilizado na produção de vigas de concreto armado. Este material foi denominado concreto de cobrimento (CC) e foi comparado com a matriz de argamassa de cimento do material compósito (F0) e com os compósitos reforçados 2% de fibras (F2), 4% de fibras (F4) e 6% de fibras (F6).

3.3.1 Dosagem e moldagem

A proporção das matérias-primas utilizadas no concreto de cobrimento dessa pesquisa, foi obtida a partir do trabalho desenvolvido por Leite (2019). De acordo com

a Tabela 14, observam-se o traço unitário em massa e o consumo de materiais do concreto. Para produzir o concreto, utilizou-se uma betoneira com capacidade para 320 litros e a sequência de mistura das matérias-primas do concreto foi baseada na pesquisa de Leite (2019), segundo a Tabela 15.

Tabela 14 - Traço unitário e consumos das matérias-primas do concreto, por m³.

Concreto de cobrimento	Cimento	Areia	Brita	Relação água-cimento
Traço unitário em massa	1,00	1,60	2,20	0,45
Consumo (kg/m³)	459,58	753,33	1011,08	206,81

Fonte: (O AUTOR).

Tabela 15 - Etapas e os tempos de mistura para produção do concreto.

Etapa	Tempo (min)	Descrição das etapas
1	1	Imprimação com cimento, areia e água (traço 1 : 2 : 0,8)
2	1	Misturar a brita e 80% da água
3	1	Acrescentar e misturar o cimento
4	5	Acrescentar e misturar a areia e 20% da água

Fonte: (O AUTOR).

A moldagem e o adensamento dos corpos de prova de concreto foram realizados de maneira semelhante ao trabalho desenvolvido por Leite (2019), a fim de repetir as mesmas condições de produção das vigas de concreto armado. Para tal, foi necessário utilizar um vibrador de imersão e o concreto foi vibrado em duas camadas.

3.3.2 Caracterização física no estado endurecido

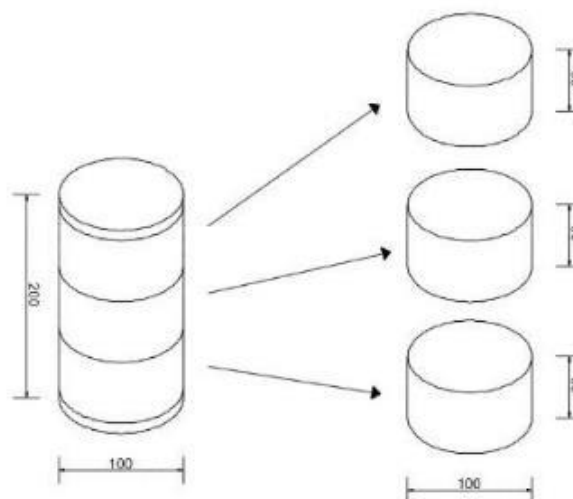
A execução do ensaio de absorção de água por imersão em três amostras de concreto foi realizada conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). O ensaio de absorção de água por capilaridade, em três amostras de concreto, foi executado conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012). Os procedimentos de ambos ensaios, aos 28 dias de idade, estão descritos no item 3.2.2.

3.4 ANÁLISE DA DURABILIDADE

3.4.1 Carbonatação

A determinação da profundidade de carbonatação se deu com base nos procedimentos estabelecidos pela ISO 1920-12 (ISO, 2015) e de acordo com a metodologia aplicada por Barin (2008), Tasca (2012), Campos (2015) e Silva (2017b). Foram moldados três corpos de prova cilíndricos com dimensões 100 mm x 200 mm para cada amostra (F0, F2, F4, F6 e CC), totalizando 15 amostras. Estas permaneceram em cura úmida até atingir os 28 dias de idade e, logo após, foram cortados com serra circular (Figura 29), em três fatias com 60 mm de altura.

Figura 29 - Esquema de corte dos corpos de prova para o ensaio de carbonatação (medidas em mm).



Fonte: (O AUTOR).

Depois do corte, as fatias de concreto tiveram suas laterais seladas com parafina (Figura 30) e mantidas por 14 dias em laboratório com umidade relativa do ar de $(75 \pm 5)\%$ e temperatura ambiente de $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$, a fim de redistribuir a umidade e possibilitar a desobstrução dos poros preenchidos com água durante o processo de cura, totalizando os 42 dias de idade das amostras.

Posteriormente, os discos selados foram colocados na câmara de carbonatação para assegurar que a penetração do CO_2 ocorresse apenas nas faces planas superior

e inferior dos discos, permitindo a medição da profundidade carbonatada ao término do ensaio (Figura 31).

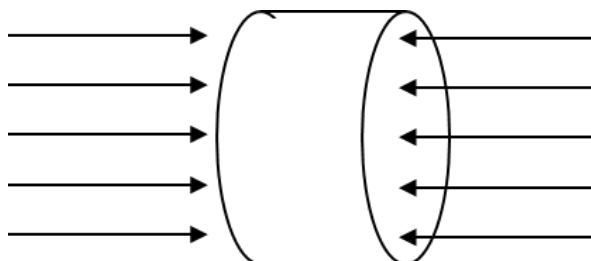
Os ensaios de carbonatação foram realizados sob temperatura de $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$, concentração de CO_2 igual a $(3,0 \pm 0,5)\%$ e umidade relativa de $(65 \pm 5)\%$, permanecendo nestas condições por 70 dias, de acordo com a ISO 1920-12 (ISO, 2015), utilizando uma câmara QUIMIS (Figura 32). As medidas foram feitas ao final de 56, 63 e 70 dias de exposição.

Figura 30 - Impermeabilização das laterais dos corpos de prova de concreto com parafina.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 31 - Sentido e direção da penetração de CO_2 .



Fonte: (O AUTOR).

Figura 32 - Câmara de carbonatação QUIMIS utilizada na pesquisa.

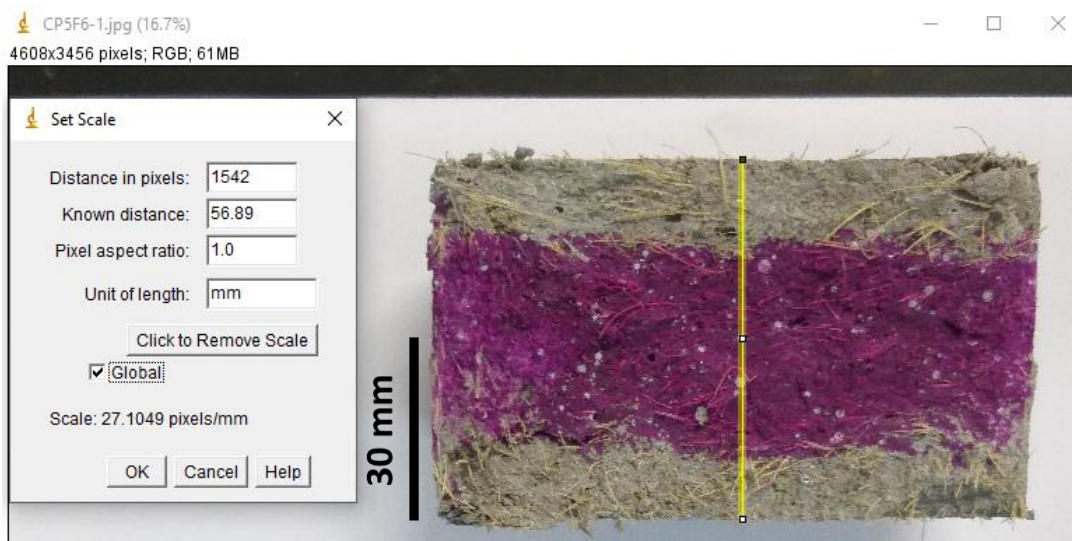


Fonte: (O AUTOR).

Após retirada da câmara nas datas pré-definidas, os corpos de prova cilíndricos foram rompidos por tração na compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), removeu-se com pincel qualquer excesso de material pulverulento, sendo aspergida solução aquosa-alcóolica indicadora de pH, contendo 1 g de fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) dissolvida em 100 ml de uma solução composta de 70 ml de etanol (álcool etílico) e 30 ml de água deionizada (SILVA, 2017b). Se essa solução for aplicada em meio com $pH \geq 9,5$ apresentará coloração róseo-avermelhada e, se aplicada em meio com $pH < 9,5$ não modificará a cor (RIBEIRO *et al.*, 2018; BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019). Com isso, foi possível identificar a área carbonatada, ou seja, a profundidade em que a pasta de cimento hidratada reagiu com o dióxido de carbono do meio.

Depois de 30 minutos da aspersão da solução, as amostras foram fotografadas de forma equidistante, com a câmera digital apoiada em um aparato. As imagens foram analisadas com o auxílio do *software ImageJ* de acordo com as Figura 33 e Figura 34. Esse *software* auxilia na quantificação da área carbonatada, informando para o usuário se há espessura de cobrimento para a proteção das armaduras, isto é, se as barras de aço ainda se encontram em meio alcalino (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

Figura 33 - Definição da escala no *software ImageJ*.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 34 - Cálculo da área carbonatada.



Fonte: (O AUTOR).

Assim, com a profundidade e a área de carbonatação quantificadas pelo *software ImageJ*, foi estimada a espessura de carbonatação que pode ser utilizada para analisar a frente carbonatada, já que o compósito da fôrma permanente funciona como cobertura das armaduras.

Ribeiro *et al.* (2018) consideram que a velocidade de carbonatação é uma grandeza inversamente proporcional à espessura da matriz cimentícia a ser

percorrida. Assim o fenômeno de difusão é representado pelo modelo de Tuutti (1982), conforme a Equação 28, baseado nas Leis de Fick.

$$dx/dt = D/x \quad (28)$$

Sendo x a profundidade de carbonatação, t o tempo e D o coeficiente de difusão. Com isso, o coeficiente de difusividade (K) pode ser determinado quando a camada de cobertura da armadura estiver carbonatada, a partir da integração da Equação 28, resultando nas Equações 29 e 30 (LIMA, 1996; RIBEIRO *et al.*, 2018).

$$t = K \cdot x^2 + K_0 \quad (29)$$

$$x = K \cdot t^{1/2} \quad (30)$$

Em que t corresponde ao tempo de exposição ao CO₂ (dias); K se refere ao coeficiente de difusividade acelerado (mm/ $\sqrt{\text{tempo}}$) e K_0 é uma constante que representa as condições superficiais da estrutura do concreto como, por exemplo, a presença de fissuras.

O valor de K_0 pode variar de 0 a 10 mm, de acordo com Diamond (1999). Nesse trabalho, adotou-se o valor dessa constante igual a zero, pois, à medida que a frente de carbonatação avança, a morfologia dos poros vai sendo alterada, bem como a característica mecânica do material como, por exemplo, a resistência à compressão, o que altera os coeficientes de difusão e desvia do perfil parabólico da Equação 30 (RIBEIRO *et al.*, 2018). Diante desse comportamento, utilizou-se a Equação 30 que expressa de maneira simplificada o processo de carbonatação, conforme foi utilizada nos trabalhos de Barin (2008), Tasca (2012), Campos (2015) e Shah e Bishnoi (2018).

Além disso, a taxa de carbonatação das matrizes cimentícias expostas ao ambiente é lenta devido à baixa concentração de dióxido de carbono na atmosfera, que pode variar de 0,03%, em ambiente rural, a 0,1%, em ambiente urbano (NEVILLE, 2015). Por isso, ensaios de carbonatação acelerada, com maiores concentrações de dióxido de carbono têm sido, frequentemente, utilizadas a fim de avaliar o desempenho de estruturas de concreto submetidas à carbonatação em menor

duração, quando comparada ao tempo de exposição de maneira natural (SHAH; BISHNOI, 2018).

Existe uma relação entre o coeficiente de carbonatação e a concentração de dióxido de carbono acelerado e natural. Nela a profundidade de carbonatação em amostras expostas a condições naturais de exposição pode ser prevista usando a Equação 31 (SHAH; BISHNOI, 2018).

$$\frac{K_{ace}}{K_{nat}} = \frac{\sqrt{C_{ace}}}{\sqrt{C_{nat}}} \quad (31)$$

Em que: K_{ace} é o coeficiente de carbonatação acelerada, K_{nat} é o coeficiente de carbonatação natural, C_{ace} é a concentração de dióxido de carbono no teste acelerado igual a 3% (ISO, 2015) e C_{nat} é a concentração de dióxido de carbono na condição de exposição natural igual a 0,1% segundo Neville (2015).

3.4.2 Migração de cloretos

O ensaio de migração de cloretos foi feito com base no procedimento sugerido por Andrade (1993) e desenvolvido por Ribeiro (2010), de acordo com a Figura 35 em que a migração dos íons cloro ocorre devido a uma diferença de potencial elétrico, cuja tensão é de 12 V (em corrente contínua), medindo-se a condutividade elétrica da solução anódica a cada 24 h, em que a amostra de concreto fica entre duas soluções: uma com água destilada e deionizada (anódica) e a outra com cloreto de sódio (NaCl) (catódica). A partir disso, os íons cloro migram da célula catódica para a anódica e a medida da condutividade na célula anódica é feita por um condutivímetro digital.

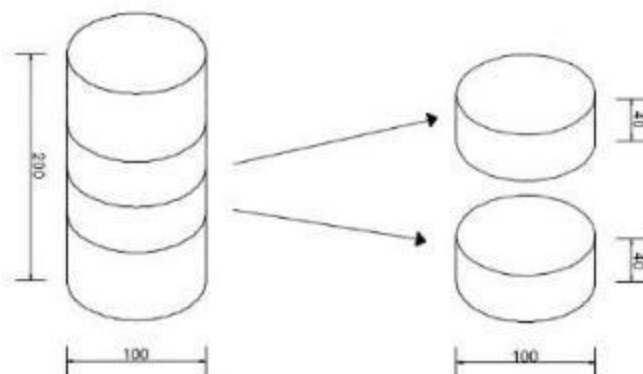
Figura 35 - Aparato de migração de cloretos.



Fonte: (O AUTOR).

Para a realização desse ensaio, são necessários quatro corpos de prova com diâmetro igual a 100 mm e altura de 40 mm para as amostras de F0, F2, F4, F6 e CC, obtidos conforme ilustrado na Figura 36.

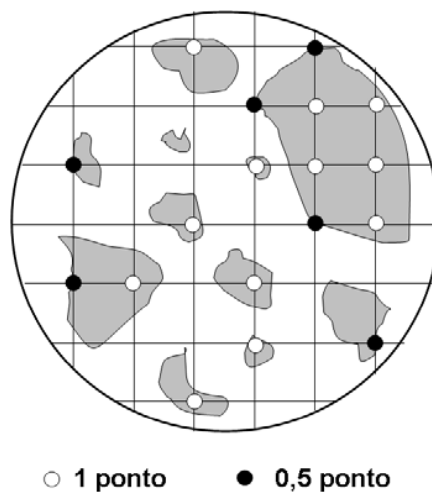
Figura 36 - Obtenção de amostras para realização de ensaio de migração de cloretos (medidas em mm).



Fonte: (O AUTOR).

A seleção das amostras de concreto de cobrimento (CC) foi realizada conforme a proposta de Ribeiro (2010) que é uma adaptação da ASTM E 562 (ASTM, 1999), dispensando o uso dessa técnica para as amostras com 0%, 2%, 4% e 6% de fibras, já que estes não possuem agregado graúdo. Essa seleção foi necessária devido à heterogeneidade do concreto, que leva a uma diversidade na relação entre os teores de agregado graúdo e de pasta, inviabilizando as comparações efetivas entre as amostras. Dessa maneira, estimou-se a porcentagem de uma fase de interesse, colocando uma grade sobre a amostra e contando os nós da rede que estiverem sobre a fase em questão, sendo que os nós que se sobrepõem na zona de transição têm valor de 0,5 ponto e aqueles que se sobrepõem na fase em análise têm valor de 1 ponto. Em seguida, dividiu-se este valor obtido pelo total de nós, estimando o percentual da fase. A representação desse procedimento pode ser vista na Figura 37.

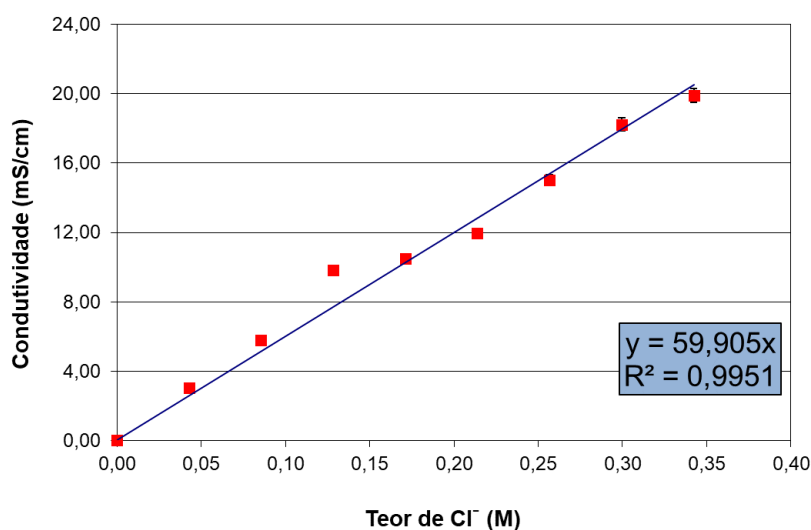
Figura 37 - Representação esquemática do procedimento de estimativa das fases do concreto, adaptada da norma ASTM E 562 (ASTM, 1999).



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Para medir a quantidade de cloretos que migraram pelo concreto estudado, foi utilizada a metodologia proposta por Castellote, Andrade e Alonso (2001) e Ribeiro (2010), por meio do uso de um condutímetro digital portátil tipo caneta, modelo CD-880 da marca *Instrutherm*. Inicialmente, foi ajustada a curva de condutividade elétrica em função da concentração de cloretos em solução. Para tal, foram medidas as condutividades elétricas em soluções contendo nove diferentes concentrações de NaCl, obtendo-se, assim, a curva de calibração, de acordo com a Figura 38.

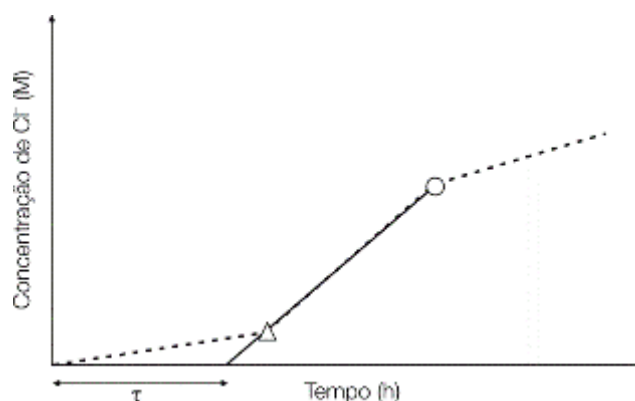
Figura 38 - Condutividade elétrica em função da concentração de cloretos em solução.



Fonte: (O AUTOR).

Durante o ensaio de migração, a concentração molar (M) de cloretos varia em função do tempo (horas), conforme a Figura 39, sendo possível determinar o *time lag* (τ), o início (Δ) e fim (O) do estado estacionário de difusão (D_s) (RIBEIRO *et al.* 2018).

Figura 39 - Curva padrão do ensaio de migração de cloretos.



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Durante a realização do ensaio, inicialmente, existe um período em que a quantidade de cloretos que passa para a célula anódica (com água destilada e deionizada) é insignificante (CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 2001; RIBEIRO *et al.*, 2018). Esse período é conhecido por *time lag*, que consiste no tempo necessário para que os cloretos atravessassem a amostra, saturando-a, e é obtido por meio da interseção entre o prolongamento da reta que caracteriza o estado estacionário e o eixo do tempo (RIBEIRO, 2010). O *time lag* é necessário para a determinação do coeficiente de difusão no estado não-estacionário, que representa passagem dos íons cloro, pelos poros da amostra ensaiada e sem promover o fluxo constante de íons (RIBEIRO, 2010).

Após esse período, o fluxo de íons cloro através da amostra se torna constante, o que corresponde ao estado estacionário (AMORIM JÚNIOR *et al.*, 2019). Para determinar o coeficiente de difusão no estado não-estacionário (D_{ns}), a partir de ensaios de migração, utilizam-se as Equações 32 e 33 propostas por Castellote, Andrade e Alonso (2001).

$$D_{ns} = \frac{2 \cdot l^2}{\tau \cdot v^2} \cdot \left[v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right] \quad (32)$$

$$v = \frac{z.e.\Delta\Phi}{k.T} \quad (33)$$

Sendo, l a espessura do corpo prova (cm), τ o *time lag* do ensaio de migração (s); k a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K); T é a temperatura (K); e equivale à carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C); z é a valência dos íons (para cloretos = 1) e $\Delta\Phi$ é a média da tensão (V) que efetivamente atravessa a amostra durante o estado não estacionário.

O fluxo dos íons cloro (J_{Cl}), no estado estacionário, pode ser calculado a partir da inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos na célula anódica (dC/dt) *versus* tempo, o qual foi obtido pelo ensaio de migração, de acordo com a Equação 34. O coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s) é calculado por meio da Equação 35 de Nernst-Plank modificada.

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (34)$$

Em que, A é a área da seção do corpo de prova exposta (cm²) e V o volume da célula catódica, com cloretos (cm³).

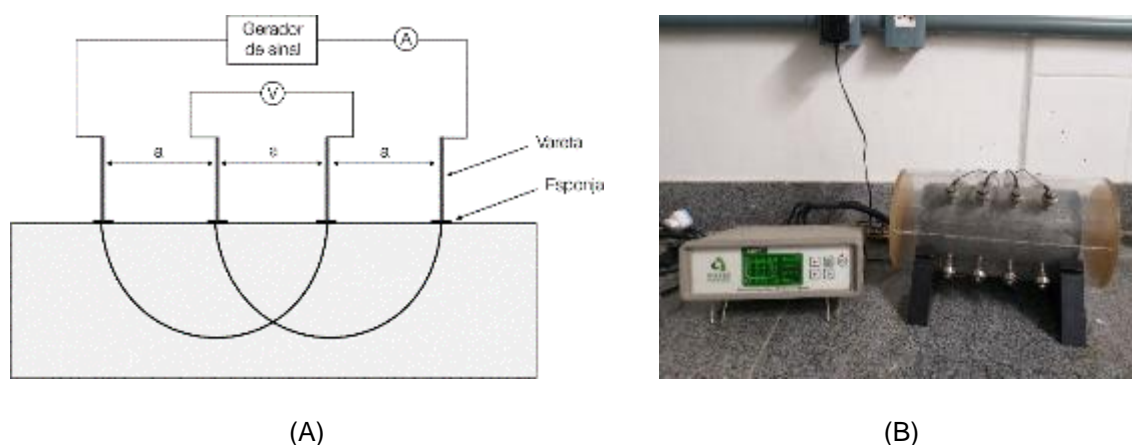
$$D_s = \frac{J_{Cl}.R.T.l}{z.F.C_{Cl}.\gamma.\Delta\Phi} \quad (35)$$

Em que, J_{Cl} é o fluxo de íons (mol/(s.cm²)), R é a constante de gases (1,9872 cal/(mol.K)); T é a temperatura (K); l é a espessura do corpo de prova (cm); z é a valência dos íons (para cloretos = 1); F é a constante de Faraday (23063 cal/(volt.eq)); C_{Cl} é a concentração de Cl⁻ na célula catódica (mol/cm³); γ é o coeficiente de atividade da solução da célula catódica (0,657 para o Cl⁻) e $\Delta\Phi$ é a média da tensão (V) que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado estacionário.

3.4.3 Resistividade elétrica

Para a medição da resistividade elétrica superficial das misturas F0, F2, F4 e F6, baseada no princípio de Wenner, utilizou-se o equipamento *Surface Electrical Resistivity Meter*, fabricado pela *Giatic Scientific*, que também possui espaçamento de 50 mm entre as sondas. O equipamento é capaz de identificar resistividades de 0,1 kΩ.cm até 1000 kΩ.cm, através da geração de corrente alternada com frequências que podem variar de 13 a 100 Hz, conforme mostrado Figura 40A. Com isso, foram moldados três corpos de prova cilíndricos para amostra, com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Os corpos de prova ficaram em cura submersa até o momento do ensaio, que foi realizado aos 28 dias de idade (Figura 40B).

Figura 40 - (A) Esquema de medição da resistividade elétrica do concreto, segundo o princípio de Wenner; (B) Execução do ensaio de resistividade elétrica com equipamento de bancada.



Fonte: (RIBEIRO *et al.*, 2018; O AUTOR)

A partir da técnica de resistividade elétrica, é possível medir a intensidade de corrente elétrica, e, diante da razão entre a tensão fornecida e a corrente encontrada, encontra-se o valor da resistência (R), segundo a Lei de Ohm (Equação 36).

$$R = \frac{U}{I} \quad (36)$$

A partir do valor da resistência (R), multiplica-se este por um fator de correção chamado constante de célula (κ), que depende das dimensões do corpo de prova em

análise e da relação entre a área deste em contato com os eletrodos e a distância entre eles, a fim de encontrar a resistividade elétrica da matriz cimentícia (ρ_e), segundo a Equação 37 (RIBEIRO, 2010).

$$\rho_e = k.R \quad (37)$$

Substituindo o valor da constante k por parâmetros geométricos e a resistência (R) pela relação U/I (Lei de Ohm), encontra-se a Equação 38.

$$\rho_e = \frac{U.S}{I.a} \quad (38)$$

Em situação específica de eletrodos circulares, conforme Ribeiro *et al.* (2018) tem-se a Equação 39.

$$\rho_e = \frac{2.\pi.U.a}{I} \quad (39)$$

Em que: ρ_e é a resistividade elétrica ($\Omega.cm$); U é a tensão aplicada ao circuito (V); I é a intensidade de corrente medida (A); S é a área da face do corpo de prova em contato com os eletrodos (cm^2); e a é a distância entre os eletrodos (cm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO COMPÓSITO SISAL-CIMENTO

4.1.1 Absorção de água por imersão

A Tabela 16 apresenta os resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica das amostras, aos 28 dias de idade. A nomenclatura utilizada nessa pesquisa, corresponde ao percentual de fibras de sisal adicionado à matriz cimentícia, em massa, sendo: F0 (matriz de argamassa), F2 (2% de fibras), F4 (4% de fibras) e F6 (6% de fibras).

Tabela 16 - Valores médios obtidos do ensaio de absorção de água por imersão das misturas F0, F2, F4 e F6.

Mistura	Absorção por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)
F0	9,39 (0,12)	16,14 (0,15)	1,720 (0,008)
F2	7,54 (0,65)	12,66 (1,09)	1,678 (0,001)
F4	9,23 (0,93)	15,53 (1,59)	1,683 (0,002)
F6	11,25 (0,49)	19,13 (0,79)	1,701 (0,005)

Nota: Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: (O AUTOR).

Conforme o espalhamento de 400 ± 10 mm (sem golpes) medido na mesa de consistência, a mistura F0 é uma argamassa de consistência fluida, em que as partículas de agregado miúdo estão imersas no interior da pasta aglomerante (CARASEK, 2010). Segundo o espalhamento de 270 ± 10 mm (com golpes) medido na mesa de consistência, as misturas F2, F4 e F6, por terem fibras, é demonstrado que esses compósitos são diferentes de F0 e tendem a reduzir a trabalhabilidade.

A Tabela 16 apresenta que a mistura F2 teve menores percentuais de absorção de água e de índices de vazios em relação aos compósitos F4 e F6 e que a matriz de argamassa (F0) apresenta parâmetros semelhantes à mistura F4, tornando-a tão porosa quanto F4. Isso ocorre, pois a movimentação de água dentro da estrutura da matriz depende das características dos poros existentes, pois quando essa matriz, no estado endurecido, está em contato com a umidade do ambiente há uma tendência a entrar em equilíbrio, sendo que a água, da superfície exposta da matriz, evapora em atmosferas mais secas (SANTOS; FONTES; LIMA, 2017).

Conforme a Tabela 16, é visto que os percentuais de absorção de água e de índices de vazios aumentam, à medida que são elevados os teores de fibras entre as misturas F2, F4 e F6. Isso ocorre, porque as fibras de sisal possuem natureza hidrofílica, terem uma estrutura celular porosa e isso influencia na porosidade do compósito (MEGIATTO JR., 2006; JOHN; THOMAS, 2008; FARUK *et al.*, 2012; TESSARO *et al.* 2015; LIMA *et al.*, 2018; BORGES; MOTTA; PINTO, 2019; THYAVIHALLI GIRIJAPPA *et al.*, 2019; AZEVEDO *et al.* 2020).

Além disso, o aumento da probabilidade de interconexão dos poros causado pela presença das fibras e a entrada de água pelas misturas F2, F4 e F6, pode ter sido facilitada pelo alinhamento preferencial das fibras no sentido longitudinal, orientação destas na fôrma permanente. As fibras vegetais, durante a etapa de mistura com as outras matérias-primas das misturas F2, F4 e F6, também atuam como agentes incorporadores de ar, o que aumenta também a porosidade dos compósitos (SAVASTANO JR.; AGOPYAN, 1999; BORGES; MOTTA; PINTO, 2019).

Conforme os dados apresentados na Tabela 16, observa-se também que os valores da massa específica dos compósitos F2, F4 e F6, de maneira geral, são menores que F0, o que demonstra que a inclusão de fibras influencia na trabalhabilidade dos compósitos e conseqüentemente uma quantidade grande de ar pode ser incorporado durante a mistura, caso não haja homogeneização adequada (LIMA, 2004). Dessa maneira, as fibras reduzem a trabalhabilidade do compósito e isso dificulta a aderência entre a fibra e a matriz, em que é formada uma zona de transição, mais porosa, a qual permite a passagem de água (RAHMANI *et al.*, 2011; HIDAYA; MUTUKU; MWERO, 2017; LIMA *et al.* 2018).

A técnica de absorção de água por imersão fornece uma estimativa do volume total de macroporos e interconectados, o que justifica o aumento na porosidade dos compósitos com maiores teores de fibras. Assim, esses resultados foram considerados relevantes por influenciarem negativamente na durabilidade de vigas de concreto armado que utilizem fôrmas permanentes, fabricadas em compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal. Já que a entrada de agentes deletérios ocorre, principalmente, através dos poros permeáveis.

4.1.2 Propagação de ondas ultrassônicas

A Tabela 17 apresenta os resultados de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais dos corpos de prova das misturas F0, F2, F4 e F6, aos 28 dias de idade.

Tabela 17 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica das misturas F0, F2, F4 e F6.

Mistura	Velocidade média de propagação de onda (km/s)	Qualidade da amostra (BS EN 12504-4)
F0	3,81 ($\pm 0,028$)	Boa
F2	3,78 ($\pm 0,016$)	Boa
F4	3,74 ($\pm 0,018$)	Boa
F6	3,68 ($\pm 0,042$)	Boa
Nota: Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.		

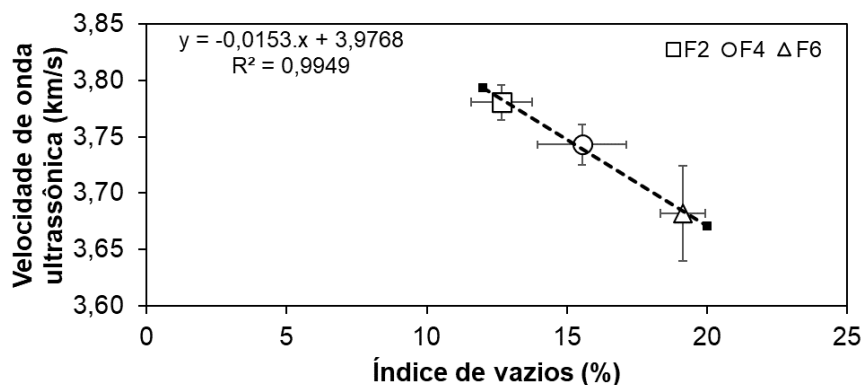
Fonte: (O AUTOR).

A partir da análise da Tabela 17, verifica-se que entre as misturas F2, F4 e F6 contendo os maiores teores de fibras apresentaram menores velocidades de propagação da onda ultrassônica, em relação a F0, o que ratifica a diferença entre os compósitos e a matriz de argamassa conforme os resultados encontrados na Tabela 16. Além disso, a incorporação de ar pelas fibras de sisal, durante o processo de mistura, a superfície da fibra, por ser irregular em tamanho e forma, interfere na zona transição e na sua aderência com a matriz (GONÇALVES, 2016; KIRTHIKA; SINGH; SURYA, 2018). Esse tipo de fibra vegetal possui a tendência de variação volumétrica, que indica a capacidade de absorção de água pela fibra, sendo este um fenômeno que influencia na durabilidade do concreto (CARRARO, 2018).

A Norma britânica BS EN 12504-4 (BS, 2000) apresenta a classificação da qualidade do concreto a partir das faixas de velocidade de propagação de onda ultrassônica, segundo a Tabela 12. Apesar desse parâmetro ser importante para classificar as misturas F0, F2, F4 e F6, estas foram consideradas de mesma qualidade, a partir dos valores de velocidade de propagação de onda ultrassônica encontrados, de acordo com a Tabela 17.

A Figura 41 indica correlação linear entre os resultados de índices de vazios e velocidade de onda ultrassônica entre as misturas F2, F4 e F6, pois houve distinção entre os valores de velocidade de propagação de onda encontrados e que estes foram influenciados pelo aumento do teor de fibras de sisal.

Figura 41 - Correlação entre os resultados de índices de vazios e velocidade de onda ultrassônica das misturas F2, F4 e F6.



Fonte: (O AUTOR).

O teste de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é um indicador muito sensível de presença de poros nos compósitos de matrizes cimentícias, pois as ondas longitudinais propagadas atravessam a amostra e, o tempo e a velocidade necessários para esse percurso variam em função da densidade do material, permitindo a estimativa das discontinuidades nas misturas. Essas discontinuidades representam, de maneira indireta, indicativos de durabilidade da amostra. Sendo assim, quanto mais poroso é o material, menor é a velocidade de propagação de ondas.

4.1.3 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das misturas F0, F2, F4 e F6, aos 28 dias de idade. Desse modo, a absorvibilidade está relacionada à difusividade hidráulica, pois representa a velocidade de penetração da água nos momentos iniciais e é dependente das características superficiais da matriz, de acordo com a Tabela 18. Diferentemente da absorção por imersão, conforme a Tabela 16, que é influenciada pela pressão hidráulica, a absorvibilidade é função da absorção capilar, estabelecida pela diferença de umidade entre a superfície livre do líquido, que entra em contato com o sólido poroso, e a superfície do mesmo líquido dentro do capilar (SANTOS; FONTES; LIMA, 2017).

Tabela 18 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das misturas F0, F2, F4 e F6.

Mistura	Absorção por capilaridade i (g/cm ²)	Absortividade S (g/cm ² .h ^{1/2}) ^b	Parâmetro C^b (g/cm ² .h ⁻¹) ^b	Índice de desempenho ^c ID (g/cm ² .h ^{1/2}) ⁻¹
F0	1,03 (0,32) ^a	0,254 (0,026) ^a	-0,0033 (0,0133) ^a	3,30
F2	0,77 (0,30) ^a	0,184 (0,009) ^a	-0,0138 (0,0059) ^a	4,76
F4	0,82 (0,29) ^a	0,189 (0,007) ^a	-0,0073 (0,0026) ^a	4,48
F6	1,00 (0,44) ^a	0,200 (0,007) ^a	-0,0081 (0,0028) ^a	4,05

Nota: a) os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão, b) $R^2 = 1$ segundo a Equação 19 e c) conforme a Equação 20.

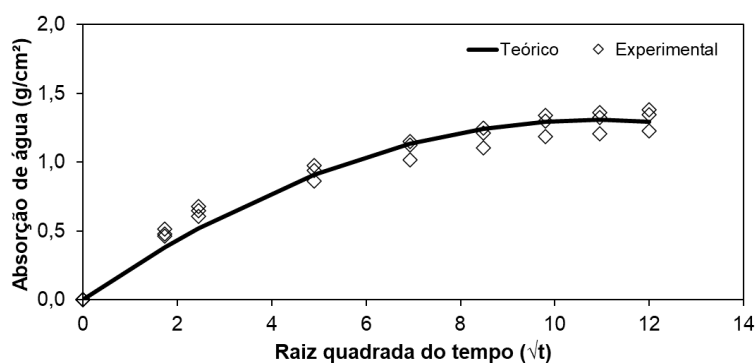
Fonte: (AUTOR).

O índice de desempenho (ID) indica o grau de dificuldade para que um fluido penetre e permaneça escoando no meio poroso, segundo a Equação 20. De um lado, segundo a Tabela 18, F0 possui menor ID que os compósitos F2, F4 e F6, ou seja, menor resistência à penetração de água, devido a maior presença de poros. Por outro lado, entre F2, F4 e F6, reduziu-se esse índice de desempenho de 5,88% (F4) e 14,92% (F6), em relação à F2, o que facilita a entrada de agentes agressivos, quando há aumento do teor de fibras.

A partir da correlação entre a Equação 19 e as quatro curvas experimentais obtidas nesta pesquisa, para cada mistura, conforme a Figura 42 (F0), Figura 43 (F2), Figura 44 (F4) e Figura 45 (F6), foi possível obter os valores de absortividade (S) e das respectivas constantes experimentais (C_t) apresentados na Tabela 18. O valor de absortividade corresponde ao máximo valor de absorção de água (i), isto é, o ponto a partir do qual a relação entre i e $t^{1/2}$ se torna constante.

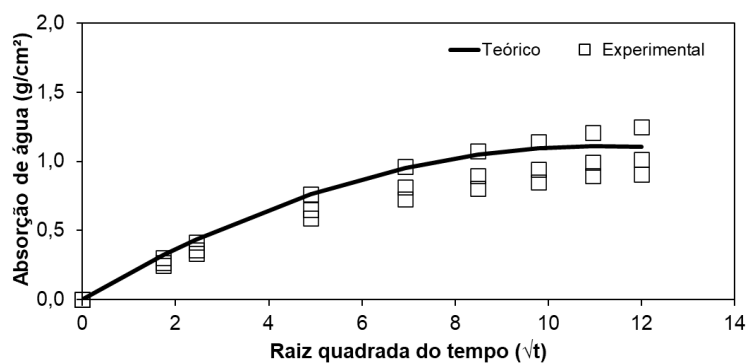
Ao analisar os resultados, percebe-se que os compósitos F2 (Figura 43) e F4 (Figura 44), em relação a F0 (Figura 42), tiveram menores valores de absortividade, com ao aumento do teor de fibras na matriz, isto é, F0 atingiu mais rapidamente o ponto máximo de absorção de água. Esse comportamento ratifica os resultados de absorção de água por imersão já discutidos e foi semelhante aos resultados encontrados por Lima (2004) e Borges, Motta e Pinto (2019) que, devido à redução do tamanho dos poros ou a interconectividade entre eles, a absorção por capilaridade reduziu em relação à matriz de referência.

Figura 42 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F0.



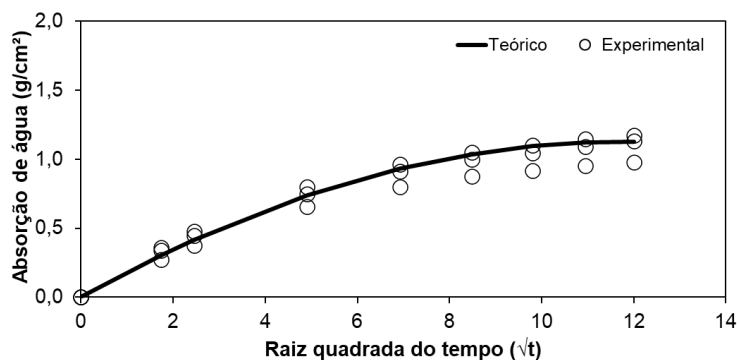
Fonte: (AUTOR).

Figura 43 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F2.



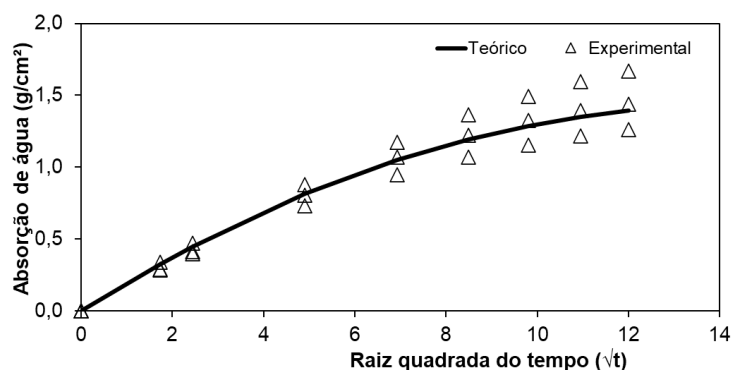
Fonte: (AUTOR).

Figura 44 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F4.



Fonte: (AUTOR).

Figura 45 - Curva teórica e experimental de absorção capilar de água função da raiz quadrada do tempo para F6.



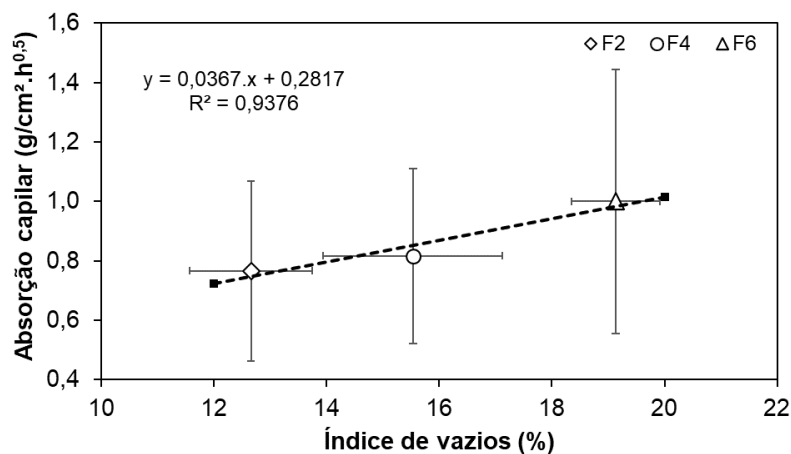
Fonte: (AUTOR).

As Figura 43, Figura 44 e Figura 45 mostram que há um crescimento nos valores de absorvidade dos compósitos F2, F4 e F6, nessa ordem, quando comparados entre si, ou seja, F2 atingiu mais lentamente o ponto máximo de absorção de água do que as demais misturas, e esse percentual de fibras utilizada nessa pesquisa, pode ser considerado um teor ótimo em compósitos com fibras vegetais. O crescimento de absorvidade tem relação com a tendência das fibras vegetais (lignocelulósicas) em absorverem água e aumentarem a espessura da zona de transição formada entre as fibras e a matriz. Um comportamento semelhante também foi observado por Farooq, Saleem e Ahmad (2017) os quais avaliaram a influência da adição de fibras vegetais em matrizes cimentícias. Farooq, Saleem e Ahmad (2017) e Azevedo *et al.* (2020) concordam que devido à variação do teor de fibras vegetais, este é um fator de influência no aumento da absorção de água por capilaridade de matrizes cimentícias que utilizam esse tipo de reforço.

Desse modo, afirma-se que a presença das fibras de sisal é determinante no aumento da absorção capilar dos compósitos. Sendo que, dentre os compósitos analisados, houve uma melhora da absorvidade daquele compósito F2, já que o baixo teor de fibras de sisal favoreceu o adensamento do compósito e contribuiu para redução da absorção capilar (BOLAT *et al.*, 2014).

Observa-se na Figura 46 que houve correlação linear entre os índices de vazios e coeficiente de absorção de água por capilaridade das misturas F2, F4 e F6.

Figura 46 - Correlação entre os resultados de índices de vazios e de absorção por capilaridade das misturas F2, F4 e F6.



Fonte: (O AUTOR).

Desse modo, percebe-se que há influência do teor de fibras nos parâmetros físicos dos ensaios de absorção de água, o que favorece a entrada de água para o interior do compósito sisal-cimento e, conseqüentemente, prejudica a durabilidade das fôrmas permanentes que utilizem esse tipo de material compósito.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPÓSITO SISAL-CIMENTO

A Tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade estático e dinâmico de F0, F2, F4 e F6, aos 28 dias de idade.

Tabela 19 - Resistência à compressão axial, módulo de elasticidade estático e dinâmico das misturas F0, F2, F4 e F6.

Mistura	Resistência à compressão axial (MPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
F0	29,72 (3,07)	27,10 (1,70)	22,49 (0,02)
F2	28,96 (2,12)	24,30 (1,55)	21,58 (0,18)
F4	25,72 (2,13)	20,76 (0,71)	21,22 (0,21)
F6	23,98 (2,81)	18,88 (0,59)	20,76 (0,48)

Nota: Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: (O AUTOR).

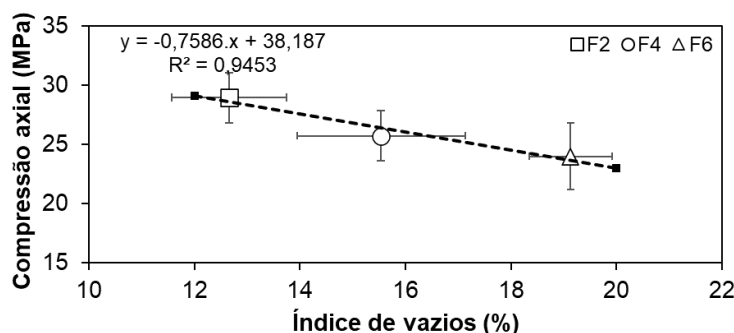
Conforme a Tabela 19, observa-se uma redução nos valores de resistência à compressão axial dos compósitos à medida que se aumenta o percentual de fibras de sisal, em relação à F0, na ordem de 2,55% (F2), 13,46% (F4) e 19,31% (F6). Essa propriedade mecânica também foi avaliada em compósitos com fibras de sisal, nos trabalhos desenvolvidos por Lima, Toledo Filho e Melo Filho (2014); Santos, Fontes e Lima (2017); Lima *et al.* (2018); e Leite (2019). Essas pesquisas utilizaram variados percentuais, em massa, de fibras de sisal nas matrizes cimentícias: Lima, Toledo Filho e Melo Filho (2014) utilizaram compósitos (w/agl 0,45) reforçados com 2%, 4% e 6% fibras; Santos, Fontes e Lima (2017) adicionaram 4% e 6% em concretos (w/c 0,40); Lima *et al.* (2018) adicionaram 6% de fibras em compósitos com w/agl de 0,35; e Leite (2019) usou compósitos com 4% (w/agl 0,35) e 6% (w/agl 0,40).

Existem trabalhos que afirmam sobre a influência negativa do teor de fibras de sisal na resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios. Isso ocorre, pois o uso de fibras curtas dispersas nas matrizes cimentícias reduzem trabalhabilidade do compósito no estado fresco e, durante os processos de mistura e de lançamento há maior incorporação de ar, o que aumenta a porosidade dos compósito no estado endurecido (LIMA; TOLEDO FILHO; MELO FILHO, 2014; GONÇALVES, 2016; SANTOS; FONTES; LIMA, 2017; LIMA *et al.* 2018; LEITE, 2019).

Borges, Motta e Pinto (2019) mostram que a resistência à compressão axial reduz, pois há diminuição da fluidez do compósito, quando se eleva o teor de fibras, o que também dificulta o adensamento das misturas, além da formação de “ninhos” de fibras vegetais. Outra pesquisa que ratifica essas afirmações foi desenvolvida por Okeola, Abuodha e Mwero (2018) em que, a partir dos resultados, foi constatado um decréscimo nos valores de resistência à compressão axial, quando se elevam os percentuais de fibras de sisal no concreto. Assim, acredita-se que o principal fator que contribuiu para esse comportamento foi o aumento na porosidade da matriz, conforme os resultados de absorção apresentados na Tabela 16.

A Figura 47 representa a correlação linear entre as propriedades física e mecânica, devido ao aumento do teor de fibras de sisal que teve como consequência a queda na resistência à compressão axial.

Figura 47 - Correlação entre os resultados de índices de vazios e compressão axial das misturas F2, F4 e F6.



Fonte: (O AUTOR).

A partir da correlação linear apresentada na Figura 47, afirma-se que existe uma relação entre índice de vazios e essa propriedade mecânica, que também influencia negativamente na durabilidade de vigas de concreto armado que utilize fôrma permanente, produzida com altos teores de fibras de sisal.

Os resultados de módulo de elasticidade estático apresentados na Tabela 19 mostram que, entre os compósitos F2, F4 e F6, a mistura F2 obteve o maior valor para essa propriedade mecânica. Isso ocorre, pois a incorporação de fibras provoca a redução do módulo de elasticidade mecânico, corroborando com os resultados de resistência à compressão axial. Borges, Motta e Pinto (2019) afirmam que essa redução ocorre devido às dificuldades no processo de produção e de moldagem, o que leva à baixa trabalhabilidade e à dificuldade de dispersão das fibras. Já Gonçalves (2016) afirma que essa redução de módulo de elasticidade é devida à incorporação de ar na matriz e à superfície irregular da fibra que interfere na aderência entre a fibra e a matriz.

De acordo com Lima (2004), os compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais dispersas apresentam menores valores de módulo de elasticidade, quando é elevado o teor de fibras na matriz, devido à tendência de formação de novelos e, conseqüentemente, aumentando a porosidade do material. Dessa maneira, o aumento na porosidade da matriz presente nas misturas, a dificuldade de dispersão das fibras curtas e o adensamento influenciam negativamente na aderência entre a fibra

e a matriz, à medida que se variou o percentual de fibras nos compósitos (LIMA; TOLEDO FILHO; MELO FILHO, 2014; LEITE, 2019).

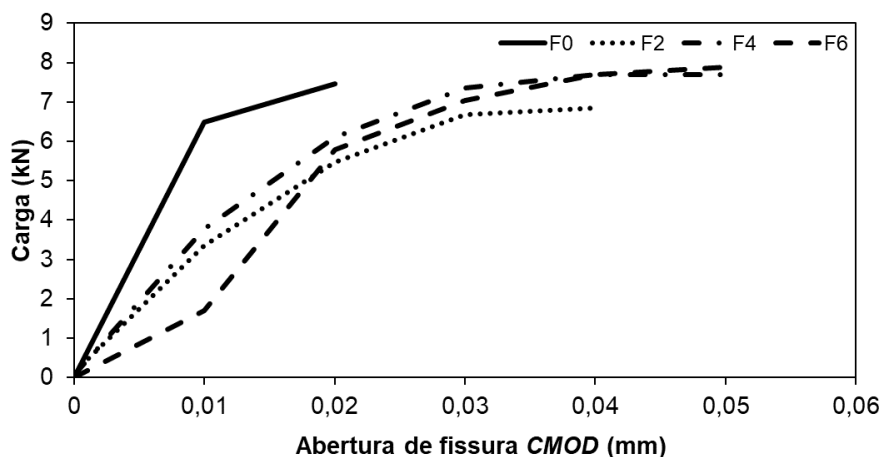
Diante dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico apresentados na Tabela 19, percebe-se que os valores dessa propriedade são praticamente estáveis, havendo uma leve redução, à medida que foi elevado o teor de fibras nos compósitos F2, F4 e F6, ratificando os resultados anteriores de análise da resistência mecânica.

Esses resultados obtidos estão relacionados com o aumento da porosidade dos compósitos na presença das fibras vegetais (SAVASTANO JR.; AGOPYAN, 1999) e com a incorporação de ar durante o processo de mistura (SAVASTANO JR.; WARDEN; COUTTS, 2003; LIMA, 2004). Devido à heterogeneidade provocada pela distribuição das fibras na matriz e do percentual destas nos compósitos F2, F4 e F6, gera o efeito de ouriços, fenômeno causado pela aglomeração das fibras que tem relação, principalmente, com o processo de mistura (FIGUEIREDO, 2011). Além disso, Gonçalves (2016) diz que por se tratar de um ensaio que analisa a homogeneidade dos compósitos, quando são adicionadas as fibras e por possuírem diferentes formas, essa propriedade é alterada.

A análise do módulo de elasticidade estático dos compósitos é importante na determinação de esforços solicitantes e na observação do comportamento de estruturas concreto armado, por exemplo, que utilizem a fôrma permanente fabricada em compósito reforçado com fibras de sisal. Já o módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos, por resposta acústica, é necessário para avaliar a homogeneidade do material. Portanto, se o compósito é menos denso, aumenta a possibilidade de entrada de agentes agressivos, o que prejudica a durabilidade.

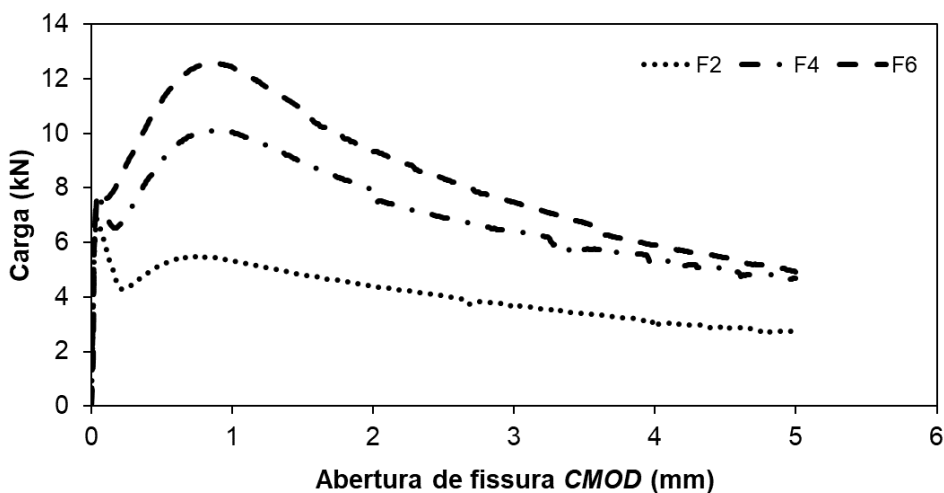
Segundo Lima (2004), o comportamento dos materiais compósitos reforçados com fibras de sisal revela que a contribuição da fibra para a resistência aos esforços de tração é maior que para os esforços de compressão. Quinino (2015) afirma que a tenacidade dos compósitos reforçados com fibras é uma propriedade importante para avaliar a capacidade de absorção de energia desses materiais até a ruptura, e normalmente é empregada na caracterização destes quanto à resistência à fratura, quando submetidos a deformações (estáticas ou dinâmicas). Sendo assim, foi necessário complementar a análise das propriedades mecânicas desses materiais com os diagramas de carga em função da abertura de fissura (*CMOD*), conforme a Figura 48 e Figura 49, a partir de ensaios de determinação de tensão à flexão residual.

Figura 48 - Diagrama de carga até 0,05 mm de abertura de fissura em F0, F2, F4 e F6.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 49 - Diagrama de carga em função da abertura de fissura em F2, F4 e F6.



Fonte: (O AUTOR).

Observa-se nas Figura 48 e Figura 49 que as misturas F0, F2, F4 e F6 apresentaram comportamento linear até o aparecimento da primeira fissura, conforme os trabalhos desenvolvidos por Lima, Toledo Filho e Melo Filho (2014), Lima *et al.* (2018) e Leite (2019). Em relação a F0, observa-se que houve ruptura frágil dessa mistura, na carga máxima de 7,47 kN, após a primeira fissura (cerca de 0,02 mm), por se tratar de uma mistura que representava a matriz cimentícia, ou seja, sem fibras. Castoldi,

Souza e De Andrade Silva (2019) também adicionou fibras de sisal em matrizes cimentícias (w/c 0,50), só que nos percentuais de 0,32%, 0,65% e 1,08%, em volume, e também observaram uma zona elástica linear antes da primeira fissura. Isso significa que, a ocorrência da primeira fissura está relacionada à resistência à tração da matriz e as fibras absorvem tensões de tração apenas na região pós-fissuração.

Percebe-se na Figura 49, também, que não houve redução de carga, após a primeira fissura, dos compósitos F4 e F6, que é um comportamento típico dos compósitos reforçados com fibras dispersas, caracterizado pelo aumento da resistência após a primeira fissura e conhecido como *deflection hardening* ou *pseudo-deflection hardening*, isto é, no pós-fissuração, a carga resistida pelo compósito é maior do que a carga necessária para romper a matriz (pico) e se caracteriza pelo surgimento de múltiplas fissuras na matriz (BENTUR; MINDESS, 2007; CIFUENTES *et al.*, 2013; LIMA; TOLEDO FILHO; LIMA, 2013; SANTOS *et al.*, 2016). O aumento da ductilidade é proporcionado pela incorporação de fibras e estas foram eficazes no aumento da resistência à flexão, da resistência pós-pico e da absorção de energia (FRAZÃO *et al.*, 2015).

Entretanto, o compósito F2, conforme a Figura 49, apresentou um comportamento contrário aos demais, conhecido por *deflection softening* que, após a fase elástica, na fase fissurada, a carga resistida pelo compósito é menor do que a carga de pico. (BENTUR; MINDESS, 2007; CIFUENTES *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2016). Essa perda ou ganho de resistência é influenciada pela aderência entre a fibra e matriz, pela resistência à tração das fibras, pelo teor e a geometria das fibras (LEITE, 2019).

Os comportamentos dos compósitos F6 e F4 são superiores a F2 no sentido de serem analisadas as cargas mais elevadas após a fissuração, ultrapassando a carga onde há o início da não linearidade. Já na curva que representa o compósito F2 há uma tendência de queda com manutenção dos valores de carga medida. Essa diferença se dá pela presença das fibras, que no caso de F0, a ruptura foi frágil e não houve aumento de resistência após a fissuração.

De acordo com Lima, Toledo Filho e Lima (2013) o comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras de sisal curtas e distribuídas aleatoriamente é caracterizado como decrescente à medida que a abertura de fissura aumenta, indicando um amolecimento. A norma RILEM TC 162-TDF (2002) mostra que a

determinação das tensões residuais é uma alternativa para avaliar, experimentalmente, esses parâmetros a partir da abertura da fissura (*CMOD*). A adição de fibras na matriz proporciona ao compósito maior controle de propagação de fissuras e elevação da tenacidade (LEITE, 2019).

A Tabela 20 representa os valores médios dos parâmetros relativos aos limites de proporcionalidade das misturas F0, F2, F4 e F6, e às tensões equivalentes e residuais de todas essas, exceto F0 já que não possui fibras de sisal. Observa-se um leve crescimento dos limites de proporcionalidade ($f_{ct,L}$), entre as misturas, sendo este parâmetro é o menos afetado pelo reforço de fibra, já que depende principalmente das propriedades da matriz (LAMEIRAS, BARROS; AZENHA, 2015; ZAMANZADEH; LOURENÇO; BARROS, 2015). As tensões equivalentes ($f_{eq,i}$) e residuais ($f_{R,i}$), apresentam uma nítida tendência em aumentar, conforme o aumento do percentual de fibras (F2, F4 e F6). Esse comportamento é esperado, uma vez que a transferência de tensões durante a propagação de fissuras tem relação com o teor de fibras (LAMEIRAS, BARROS; AZENHA, 2015; ZAMANZADEH; LOURENÇO; BARROS, 2015).

Desse modo, constata-se que houve influência do aumento do teor de fibras na resistência à flexão dos compósitos em diferentes níveis de abertura de fissura. Assim, para o desenvolvimento de elementos construtivos, que possam atuar como fôrmas permanentes, é importante assegurar que a distribuição das fibras seja adequada, evitando principalmente a presença de poros e as fôrmas possam ser utilizadas em aplicações estruturais.

Além disso, de acordo com a Tabela 13, que mostra a classificação dos compósitos a partir das tensões residuais $f_{R,1}$ e $f_{R,3}$ para fins de aplicações estruturais, e consta na norma CEB-FIP 2010 (CEB-FIP, 2011), os compósitos F2, F4 e F6 são classificados, respectivamente, como 1b, 2b e 3b. O tipo de fibra que foi utilizado como reforço da matriz cimentícia está de acordo com os parâmetros estabelecidos por CEB-FIP (2011): $f_{R,1}/f_{ct,L} > 0,4$ e $f_{R,3}/f_{R,1} > 0,5$. Com a análise dos índices de tenacidade (I_{20}) dos compósito, observou-se que esses índices aumentaram a partir da elevação dos teores de fibras: F2 ($I_{20} = 8,63$), F4 ($I_{20} = 11,51$) e F6 ($I_{20} = 14,82$). Isso mostra que houve influência das fibras na matriz cimentícia para absorverem energia até a ruptura, já que esse comportamento também foi observado no trabalho desenvolvido por Leite (2019).

Tabela 20 - Limite de proporcionalidade ($f_{fct,L}$), tensões equivalentes ($f_{eq,i}$) e residuais ($f_{R,i}$) para as misturas F0, F2, F4 e F6.

Mistura	Valores médios dos parâmetros (MPa)						
	$f_{fct,L}$	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
F0	1,59 (0,28)	-	-	-	-	-	-
F2	2,20 (0,07)	1,54 (0,42)	1,41 (0,28)	1,64 (0,29)	1,55 (0,25)	1,30 (0,22)	1,09 (0,19)
F4	2,48 (0,09)	3,23 (0,43)	2,60 (0,43)	2,91 (0,40)	2,85 (0,45)	2,21 (0,28)	1,84 (0,16)
F6	2,54 (0,13)	4,19 (0,05)	3,06 (0,06)	3,57 (0,06)	3,44 (0,09)	2,68 (0,09)	2,15 (0,06)

Nota: Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: (O AUTOR).

A partir dos resultados de resistência à flexão residual, vê-se que com o aumento do teor de fibras contribuiu-se para a melhoria da durabilidade dos compósitos – nessa ordem F2, F4 e F6 – e, conseqüentemente para a melhoria da durabilidade de vigas de concreto armado que utilizem a fôrma permanente, devido à capacidade desse elemento construtivo suportar carga, apresentando um comportamento mais dúctil com maior absorção de energia, e mesmo com o surgimento de fissuras, estas são controladas pela presença das fibras de sisal. Entretanto, todos os resultados das propriedades físicas e os outros resultados das propriedades mecânicas mostram que à medida que é aumentado o teor de fibras de sisal, prejudicam indiretamente a durabilidade. Sendo assim necessário, apresentar os resultados de análise de durabilidade que complementam os outros dados já discutidos.

4.3 CONCRETO DE COBRIMENTO

O concreto de cobrimento (CC) usado nessa pesquisa foi semelhante ao de Leite (2019) que, no seu trabalho, encontrou o valor médio de $47,93 \pm 3,60$ MPa referente à resistência à compressão axial, aos 28 dias de idade. Nessa seção, serão mostrados os resultados referentes às propriedades físicas de absorção de água por imersão e por capilaridade do CC, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados de absorção de água por imersão do concreto de cobrimento.

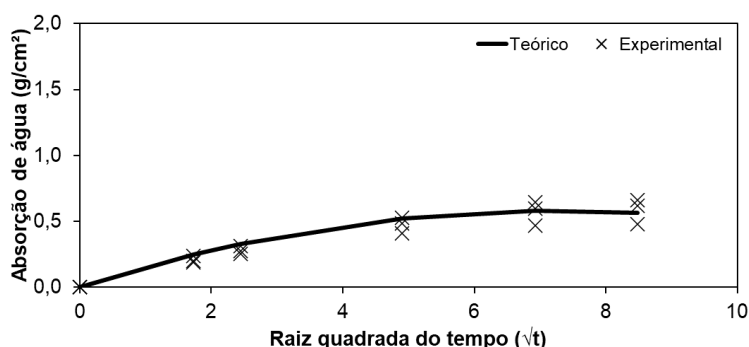
Concreto de cobrimento	Valor médio
Absorção por imersão (%)	5,43 (0,30) ^c
Índice de vazios (%)	12,36 (0,59) ^c
Massa específica (g/cm ³)	2,278 (0,016) ^c
Absorção por capilaridade i (g/cm ²)	0,42 (0,17) ^c
Absortividade ^a S (g/cm ² .h ^{1/2})	0,150 (0,011) ^c
Parâmetro C ^a (g/cm ² .h ⁻¹)	0,0155 (0,0055) ^c
Índice de desempenho ^b (g/cm ² .h ^{1/2}) ⁻¹	5,84

Nota: a) R² = 1 segundo a Equação 19; b) conforme a Equação 20; c) os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: (O AUTOR).

Conforme a Tabela 21 e os resultados de absorção de água por imersão de F2, F4 e F6 (Tabela 16), é possível afirmar que uma viga, em que o concreto que a constitui também constitui o cobrimento, absorverá menos água do que uma viga com o cobrimento da fôrma permanente em compósito reforçados com fibras de sisal nos teores de 2%, 4% e 6%. Além disso, o índice de vazios de CC foi menor do que F2, F4 e F6 e o concreto de cobrimento é mais denso do que os compósitos que representam a fôrma permanente. A Figura 50 apresenta o resultado de absorção de água por capilaridade do concreto de cobrimento.

Figura 50 - Absorção capilar de água em corpos de prova do concreto de cobrimento, em função da raiz quadrada do tempo.



Fonte: (AUTOR).

A Figura 50 também mostra que uma viga que utilize o cobrimento de concreto apresenta menor absortividade, isto é, haverá uma dificuldade maior em atingir o ponto máximo de absorção de água do que uma viga com o cobrimento da fôrma

permanente em compósito reforçados com 2%, 4% e 6% de fibras, já que a natureza hidrofílica destas facilitam a entrada de água nesse caso. Este comportamento de redução da absorvidade foi ratificado com o valor do índice de desempenho do concreto de cobrimento, segundo a Tabela 21, ser maior do que os valores desse parâmetro em F2, F4 e F6, de acordo com a Tabela 18.

4.4 ANÁLISE DE DURABILIDADE

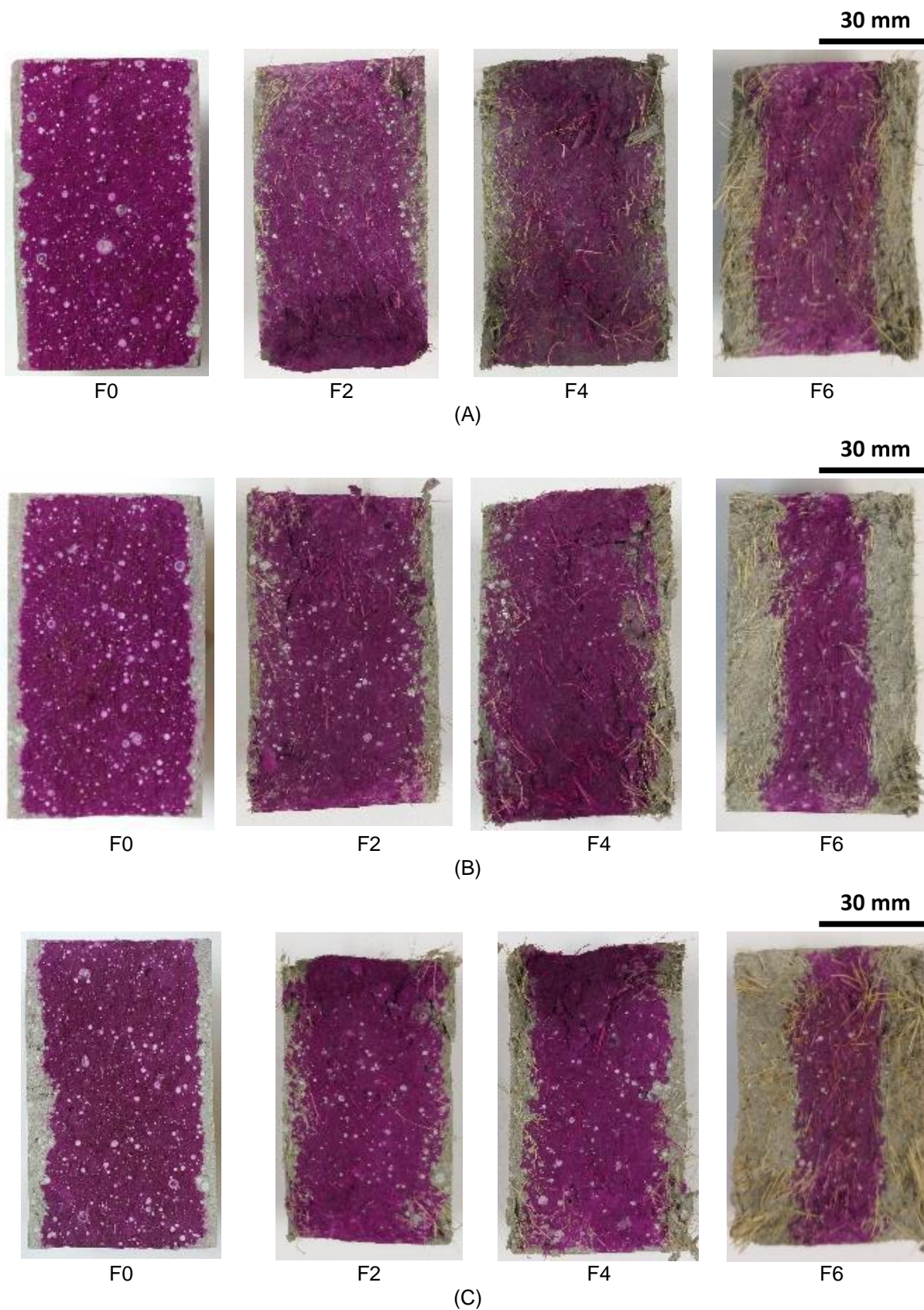
4.4.1 Carbonatação

A Figura 51 apresenta as profundidades de carbonatação das misturas F0, F2, F4 e F6, após aspersão de uma solução aquosa-alcóolica de fenolftaleína, aos 56, 63 e 70 dias de exposição à câmara de carbonatação acelerada, respectivamente.

De maneira geral observa-se que, de acordo com a Figura 51, houve evolução da frente carbonatada (zona róseo-avermelhada) até 70 dias de estudo acelerado, tanto em F0 quanto entre F2, F4 e F6. De acordo com a caracterização física dos aglomerantes, esse fenômeno ocorreu devido à alta porosidade provocada pela sílica ativa aglomerada, principalmente em F0, já que não há quebra de aglomerados de sílica ativa provocados pela adição de fibras. Em F2, F4 e F6, o aumento no teor de fibras também elevou a porosidade dos compósitos por causa dos lúmens e dos vazios nos emaranhados de fibras.

Nos primeiros 56 dias de ensaios foram constatadas pequenas alterações de coloração na matriz F0 e nos compósitos F2, F4, entretanto, em F6 essa diferença está mais evidente. Após os 63 e 70 dias de exposição, a frente de carbonatação é mais acentuada, pois a alta porosidade devido a presença das fibras e a interface entre elas e a matriz são os grandes responsáveis por este fenômeno, fazendo com que o compósito se torne mais permeável (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013). Nos períodos de 63 e 70 dias de exposição, a mistura da matriz de argamassa (F0), apresentou região carbonatada maior que F2, menor que F6 e próxima de F4. Esse fenômeno ratifica as propriedades de absorção de água, já apresentadas.

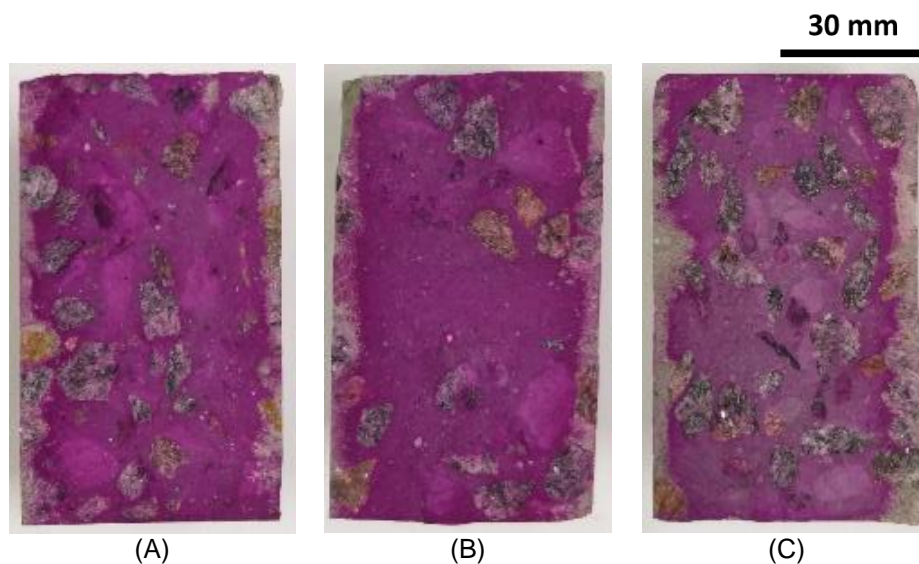
Figura 51 - Profundidade carbonatada das misturas por (A) 56 dias, (B) 63 dias e (C) 70 dias.



Fonte: (O AUTOR).

A Figura 52 mostra as profundidades de carbonatação do concreto de cobrimento (CC) após aspersão de uma solução aquosa-alcóolica de fenolftaleína aos 56, 63 e 70 dias de exposição à câmara de carbonatação acelerada.

Figura 52 - Profundidade de carbonatação do concreto de cobrimento após exposição acelerada durante (A) 56, (B) 63 e (C) 70 dias.



Fonte: (O AUTOR).

É observado, na Figura 52, que a frente de carbonatação avança para o interior de CC à medida que aumenta o tempo de exposição desse material na presença do dióxido de carbono. Esse agente agressivo penetra pelos poros do concreto por meio do mecanismo de transporte de difusão, bem como as misturas de F2, F4 e F6. Sendo assim, uma viga de concreto armado que utilize o próprio cobrimento para proteger o aço contra a corrosão, dificulta mais a entrada do CO_2 do que uma viga que tenha como cobrimento das armaduras a fôrma permanente produzida em compósito com fibras de sisal.

Com o auxílio do *software ImageJ*, foi calculada a área média carbonatada (zona sem coloração róseo-avermelhada) das amostras F0, F2, F4, F6 e CC, após 56, 63 e 70 dias de exposição, de acordo com a Tabela 22.

Tabela 22 - Área carbonatada das amostras F0, F2, F4, F6 e CC em função do tempo de exposição.

Amostra	Área média carbonatada (mm ²)		
	56 dias	63 dias	70 dias
F0	340,81 (64,17)	445,84 (28,01)	519,25 (45,36)
F2	363,62 (124,47)	428,37 (66,38)	494,49 (204,39)
F4	388,90 (68,25)	455,59 (97,24)	600,80 (36,68)
F6	904,37 (126,03)	1.315,05 (118,16)	1.404,16 (136,36)
CC	358,34 (39,33)	417,73 (53,08)	454,50 (61,07)
Nota: Os valores entre parênteses representam os desvios padrão.			

Fonte: (O AUTOR).

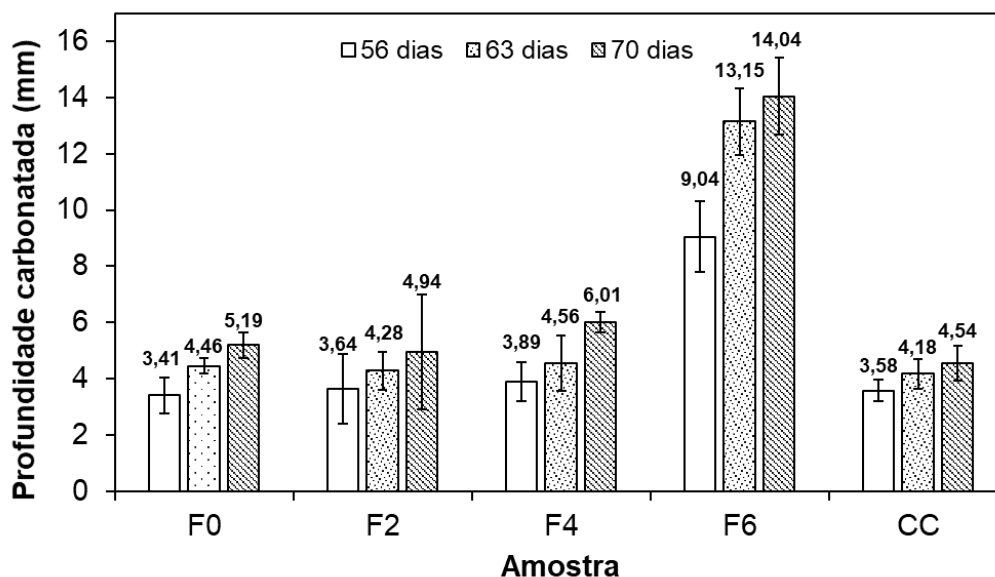
Em teoria, a adição de fibras de sisal na matriz cimentícia promove aspectos positivos e negativos quanto à durabilidade dos compósitos cimentícios. O aspecto positivo seria o fato de que, devido à sua capacidade de controlar fissuras, a presença das fibras poderia atenuar o processo de carbonatação, já que reduziria a entrada de agentes agressivos. Entretanto, os aspectos negativos deste reforço seriam que, devido a alta absorção de água pelas fibras de sisal e a incorporação de ar durante o processo de mistura, há dificuldades de moldagem, e existe aumento da porosidade total do compósito, aumentando a difusão dos CO₂ através do mesmo (Tabela 22).

Além disso, pesquisas mostram que, devido à sua natureza hidrofílica, associada à acentuada porosidade, os compósitos com fibras vegetais apresentam uma elevada capacidade de “sequestrar” o dióxido de carbono (TONOLI *et al.*, 2011; NEVES JUNIOR *et al.*, 2017).

Em se tratando da quantificação da área carbonatada do concreto, percebe-se que esses resultados ratificam a análise visual realizada por meio da aspersão da solução aquosa-alcóolica de fenolftaleína, que mostrou a diferença de pH por meio da coloração róseo-avermelhada que considera o meio com pH $\geq 9,5$ e da não modificação da cor que considera o meio com pH $< 9,5$ (RIBEIRO *et al.*, 2018; BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

A Figura 53 apresenta as profundidades de carbonatação, em média, das misturas F0, F2, F4, F6, e os respectivos desvios-padrão medidos nas idades de 56, 63 e 70 dias.

Figura 53 - Profundidades de carbonatadas de F0, F2, F4, F6 e CC aos 56, 63, 70 dias de exposição.



Fonte: (O AUTOR).

Observa-se na Tabela 22 e na Figura 53 que o aumento do teor de fibras dos compósitos resultou em um aumento da profundidade de carbonatação dos compósitos. Nos compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de sisal, a carbonatação da matriz é potencializada devido à porosidade das fibras, resultando numa maior permeabilidade das misturas devido à absorção das fibras, diminuindo assim a aderência entre a fibra e a matriz (PIZZOL *et al.*, 2014).

Os compósitos F2 e F4, nessa ordem, obtiveram os menores valores de profundidade carbonatada, para os três períodos de exposição, indicando que suas configurações estruturais são mais compacta e possuem menor continuidade dos poros, quando comparados com o compósito F6. Isso é ratificado pelos resultados encontrados no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Estes resultados também estão coerentes com a pesquisa feita por Ramli, Kwan e Abas (2013), que avaliaram o efeito da incorporação de 0,6%; 1,2%; 1,8% e 2,4% de fibras de coco, em massa, na durabilidade dos concretos reforçados com fibras naturais submetidos a ambientes agressivos e foi observado que a frente de carbonatação aumenta à medida que é elevado teor de fibras. Outro trabalho que ratifica o aumento da camada carbonatada na presença das fibras vegetais, foi desenvolvido por Pizzol *et al.* (2014), em que estes mostraram o impacto da

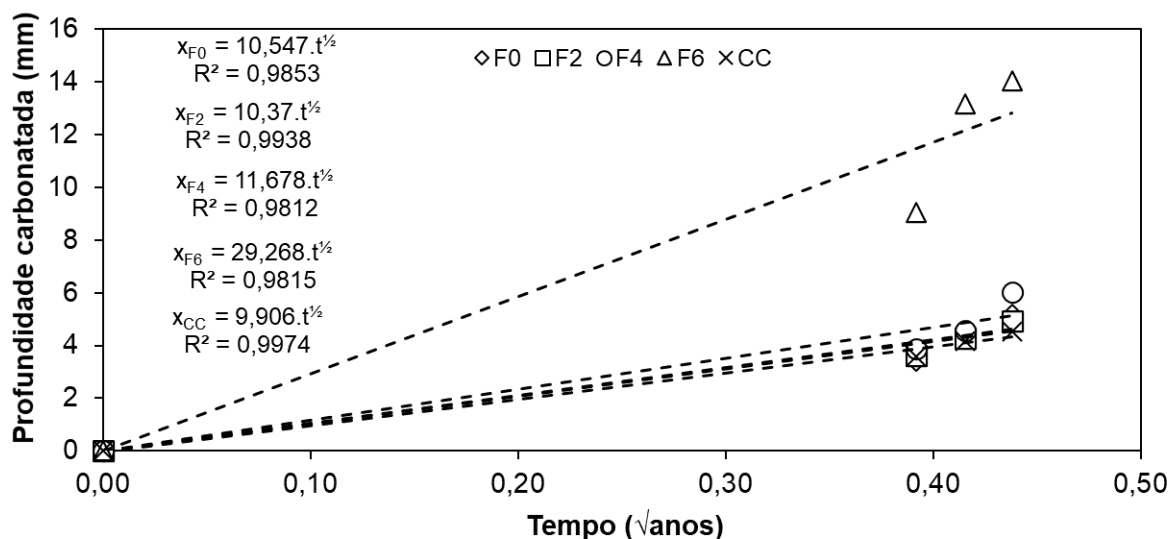
carbonatação acelerada na microestrutura e nas propriedades físicas de compósitos híbridos de fibrocimento reforçados com fibras de eucalipto e de PVA. Eles observaram, por meio de micrografias, a formação do CaCO_3 , devido a estrutura porosa da matriz, principalmente, na interface entre as fibras de celulose e a matriz de cimentícia.

Apesar da velocidade, com que a frente de carbonatação avança nos compósitos cimentícios reforçados fibras de sisal, ter sido maior nessa ordem F6, F4 e F2, a carbonatação pode melhorar a durabilidade dos compósitos já que, além da absorção de água, existem mais dois mecanismos de degradação das fibras vegetais. O primeiro deles é o ataque alcalino que provoca a perda de resistência mecânica do compósito, através dos compostos alcalinos da matriz cimentícia como, por exemplo, o hidróxido de cálcio. O segundo mecanismo é o efeito da mineralização do lúmen das fibras de sisal, devido à migração dos hidróxidos de cálcio livres. Desse modo, a carbonatação pode melhorar a durabilidade da fôrma permanente, porém, é prejudicial para a viga de concreto armado já que a fôrma funciona com cobrimento das armaduras.

Dessa maneira, percebe-se na Tabela 22 e na Figura 53 que o concreto que representa o cobrimento da viga possui menores valores de profundidade de carbonatação quando comparado ao cobrimento da viga que é a fôrma permanente em compósitos com 2%, 4% e 6% de fibras de sisal. Desse modo, a fôrma permanente, para uma viga de concreto armado prejudica mais a sua durabilidade do que sem a fôrma, ou seja, o próprio concreto da viga.

A partir das análises dos resultados de profundidades de carbonatação das misturas F0, F2, F4 F6 e CC, foi possível relacioná-los com o tempo por meio de modelos matemáticos (conforme apresentados no item 3.4.1) que determinam o coeficiente de carbonatação, de acordo com a Figura 54 (BARIN, 2008; TASCA, 2012; CAMPOS; 2015; SHAH; BISHNOI, 2018).

Figura 54 - Evolução da profundidade de carbonatação das amostras F0, F2, F4, F6 e CC em função do tempo e identificação do coeficiente de carbonatação.



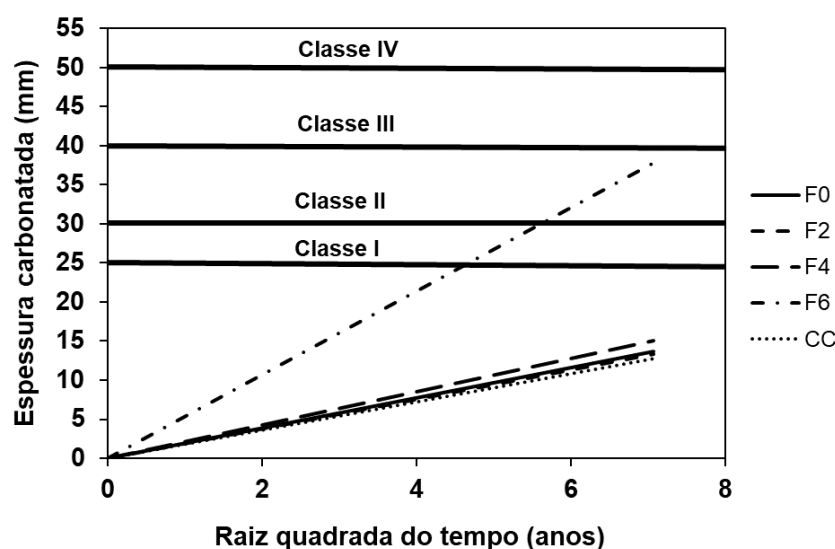
Fonte: (O AUTOR).

Conforme a Figura 54, o coeficiente de difusão de dióxido de carbono representa indicativos da velocidade desse fenômeno nas misturas estudadas em relação aos períodos de exposição. Desse modo, observa-se que o compósito F2 apresentou a menor velocidade de carbonatação acelerada, com $10,48 \text{ mm/ano}^{0,5}$. As misturas F0, F4 e F6 apresentaram coeficientes de carbonatação acelerada, respectivamente, iguais a $10,72 \text{ mm/ano}^{0,5}$, $11,89 \text{ mm/ano}^{0,5}$ e $29,76 \text{ mm/ano}^{0,5}$. Em relação ao avanço da carbonatação no concreto de cobertura, observa-se que o coeficiente de difusão acelerado é igual a $9,97 \text{ mm/ano}^{0,5}$.

Diante dos valores obtidos em ensaio acelerado, foi possível determinar coeficientes de carbonatação natural, baseado no trabalho de Shah e Bishnoi (2018). Dessa maneira, os valores médios dos coeficientes de difusão natural foram convertidos, usando a Equação 31, para: $1,82 \text{ mm/ano}^{0,5}$ (CC); $1,91 \text{ mm/ano}^{0,5}$ (F2); $1,96 \text{ mm/ano}^{0,5}$ (F0); $2,17 \text{ mm/ano}^{0,5}$ (F4); e $5,43 \text{ mm/ano}^{0,5}$ (F6). Dessa maneira, os resultados ratificam que a carbonatação em viga que use a fôrma permanente, como cobertura das armaduras é menor do que em uma viga que tenha o próprio concreto como cobertura, conforme as formulações desenvolvidas nesse estudo.

A Figura 55 mostra que, para a vida útil de projeto mínima de 50 anos (ABNT, 2013) e a espessura mínima de 30 mm em ambientes com classe de agressividade moderada (ABNT, 2014), conforme a Equação 30.

Figura 55 - Espessura carbonatada em função da raiz do tempo de exposição.



Fonte: (O AUTOR).

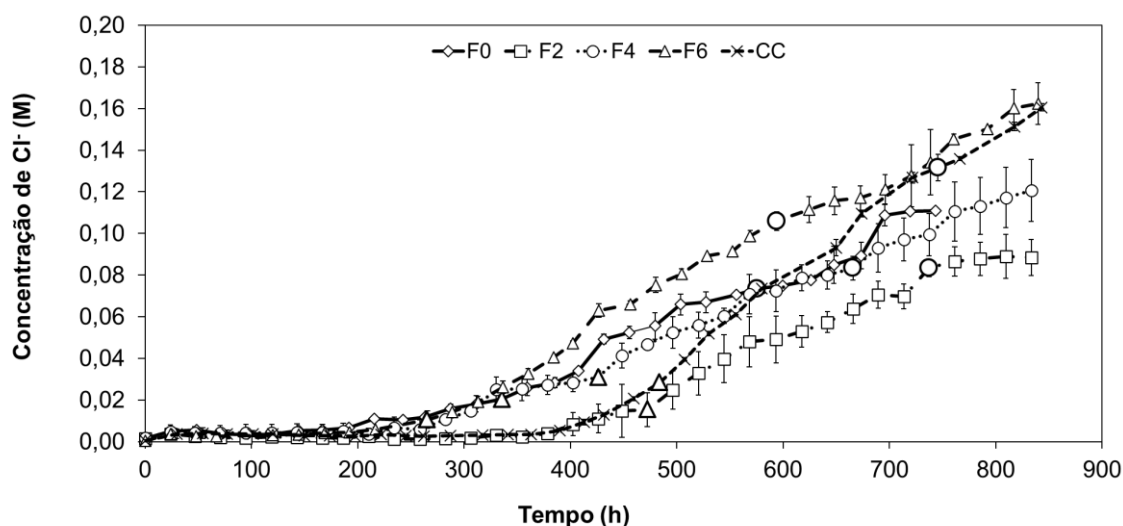
De acordo com a Figura 55, apenas o compósito F6 ultrapassou os limites estabelecidos por ABNT (2013, 2014). Isso significa que, para as condições estabelecidas, a durabilidade de compósito F6 quanto à carbonatação acelerada, é inferior às demais misturas, o que ratifica a influência negativa do aumento do teor de de fibras.

A análise da profundidade de carbonatação é uma técnica simples para serem avaliados os fenômenos que possibilitem a corrosão de vigas de concreto armado que utilizem a fôrma permanente como camada de cobertura das armaduras. Por isso, acredita-se que a difusão é o principal mecanismo de transporte do dióxido de carbono (neste caso) envolvido na carbonatação de compósitos reforçados com fibras de sisal (PIZZOL *et al.*, 2014).

4.4.2 Migração de cloretos

A evolução da concentração de íons cloro na célula anódica, em função do tempo, é apresentada na Figura 56, para as misturas avaliadas F0, F2, F4 e F6. Observa-se um deslocamento da curva de concentração molar de cloretos em função do tempo, para a direita, isto é, há um aumento do *time lag* à medida que é reduzido o teor de fibras de sisal, quando são comparados F2, F4 e F6. Além disso o comportamento de F0 está de acordo com os demais resultados de absorção, índice de vazios e profundidade de carbonatação.

Figura 56 - Evolução da concentração de cloretos na célula anódica em relação ao tempo para F0, F2, F4, F6 e CC (Δ = início do estado estacionário e \circ = final do estado estacionário).



Fonte: (O AUTOR).

É visto também na Figura 56 que a concentração máxima de cloretos livres atingida pelas misturas na célula anódica, durante o ensaio de migração de cloretos, foi de aproximadamente: 0,16 M (F6), 0,14 M (F4); 0,12 M (F0); 0,10 M (F2). Isso significa que cada mistura alcançou concentrações finais de cloretos distintas e decrescentes à medida que foi reduzido o teor de fibras, exceto em F0, o que reforça a influência dos percentuais de fibras na entrada de agentes agressivos.

Conforme a Tabela 6 é importante destacar os resultados encontrados para o teor de aluminatos no cimento (3,76%), na sílica ativa (1,47%) e, principalmente, na

cinza volante (28,73%). A presença desse alto percentil de aluminatos na adição pozo-lânica (cinza volante) contribui com a capacidade do material cimentício em fixar cloretos, formando o sal de Friedel ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$), evitando que esses íons fiquem livres e cheguem até as armaduras, iniciando o processo de corrosão. De maneira contrária, o baixo percentual de aluminatos encontrado tanto no cimento, quanto na sílica ativa, não contribui para a fixação desses íons deletérios. Desse modo, a proporção dos materiais utilizados neste trabalho (45% de cimento, 15% de sílica ativa e 40% de cinza volante) promove uma tentativa de compensação nesse aspecto.

Em relação ao concreto de cobrimento, a evolução da concentração de íons cloro na célula anódica, em função do tempo, é apresentada na Figura 56. Desse modo, percebe-se que a concentração máxima de cloretos atingida pelo concreto, no estado estacionário, foi aproximadamente igual 0,16 M. Isso mostra que o cobrimento da viga permite que os cloretos alcancem uma concentração limite semelhante a uma viga que possua F6 como cobrimento das armaduras. Tornando assim, a viga de concreto menos durável que as vigas que possuam F2 e F4 como cobrimento do aço. Entretanto, é necessário analisar outros parâmetros de durabilidade extraídos do ensaio de migração de cloretos pra comparar os diferentes tipos de cobrimento.

A Tabela 23 apresenta os valores de *time lag*, de coeficientes de difusão nos estados não estacionário e estacionário, de fluxo de íons e a classificação das amostras F0, F2, F4, F6 e CC quanto à resistência à penetração de cloretos, segundo os limites estabelecidos por Nilsson *et al. apud* Gjorv (2015), tendo como parâmetro o concreto.

Conforme a Tabela 23, o compósito F2 apresentou o menor coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) devido à redução da porosidade causada pelo menor teor de fibras. No entanto, todas as misturas analisadas foram classificadas, de forma qualitativa, como materiais de “alta” ou “muito alta” resistência à penetração de cloretos, conforme Nilsson *et al. apud* Gjorv (2015), a partir dos valores dos coeficientes de difusão no regime não estacionário.

Tabela 23 - Classificação das amostras F0, F2, F4, F6 e CC quanto à resistência à penetração de cloreto de acordo com os limites estabelecidos por Nilsson *et al. apud* Gjorv (2015).

Amostra	Time lag (h)	Fluxo de íons (10^{-9} mol/s.cm ²)	Coeficientes de difusão (10^{-8} cm ² /s)		Resistência à penetração de cloretos
			D _{ns}	D _s	
F0	221,50 (4,24)	0,39	7,80 (0,54)	0,94 (0,04)	Alta
F2	392,50 (8,37)	0,58	4,50 (0,14)	1,61 (0,32)	Muito alta
F4	289,67 (7,51)	0,39	5,67 (0,06)	0,92 (0,01)	Alta
F6	224,33 (3,30)	0,58	8,04 (0,11)	1,47 (0,02)	Alta
CC	392,38 (6,19)	0,78	5,35 (0,07)	2,06 (0,01)	Alta

Nota: Moderada ($10 < D_{ns} < 15 \times 10^{-8}$ cm²/s); Alta (5×10^{-8} cm²/s < $D_{ns} < 10 \times 10^{-8}$ cm²/s); Muito alta ($2,5 \times 10^{-8} < D_{ns} < 5 \times 10^{-8}$ cm²/s); e Extremamente alta ($D_{ns} < 2,5 \times 10^{-8}$ cm²/s); os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: (O AUTOR).

Conforme a Tabela 23, o período (*time lag*) necessário para que os cloretos atravessassem e saturem o compósito, foi maior para F2, pois esse teor proporcionou uma melhoria na densidade da matriz cimentícia, devido à redução de vazios, e consequentemente na durabilidade do material, o que contribuiu para resistência à penetração de cloretos (DE GUTIÉRREZ; DÍAZ; DELVASTO, 2005; PRIYA; THIRUMALINI, 2018). O *time lag* é fundamental determinar o coeficiente de difusão no estado não-estacionário, que representa a tentativa de passagem dos íons cloro, pelos poros da mistura ensaiada e, com ele, é possível estimar a vida útil de projeto do compósito.

Segundo a Tabela 23, o aumento na movimentação de íons cloro até o interior dos compósitos reforçados com fibras, proporcionando um fluxo constante (J_{Cl}) dos cloretos, para adições superiores a F0, foi facilitado, devido à natureza hidrofílica da fibra de sisal que absorve água, fazendo com que esse eletrólito transporte os cloretos mais rapidamente (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013; FAROOQ; SALEEM; AHMAD, 2017). Como o fluxo de íons ocorre no estado estacionário, o coeficiente de difusão deste regime (D_s) aumentou nessa ordem de teores de fibras F4, F6 e F2, o que contrapõe o efeito das fibras de sisal na penetração de cloretos.

Diante desses resultados apresentados, é possível observar que houve coerência com alguns trabalhos que mostram que o aumento do teor de fibras vegetais favorece a entrada de íons cloro em compósitos cimentícios reforçados com: 0,1% e 0,3%

de fibras de celulose, em volume (SAPPAKITTIPAKORN; BANTHIA, 2012); 0,6 a 2,4% de fibras de coco, em massa (RAMLI; KWAN; ABAS, 2013); 1,0% de fibras de sisal, em volume (BALASUBRAMANIAN; SENTHILSELVAN; SABARISH, 2016); e 0,5% de fibras de coco, em massa (FAROOQ; SALEEM; AHMAD, 2017).

Dessa maneira, afirma-se que a passagem de cloretos da célula catódica (contendo NaCl) para a célula anódica (contendo água destilada e deionizada) foi facilitada pelos compósitos com maiores teores de fibras e, provavelmente, ocorreu pela interface fibra-matriz e/ou pelo próprio lúmen da fibra de sisal (SAPPAKITTIPAKORN; BANTHIA, 2012; BALASUBRAMANIAN; SENTHILSELVAN; SABARISH, 2016).

A Tabela 23 mostra que as misturas F2, F4 e F6 e CC possuem, no mínimo, alta resistência à penetração de cloretos. Mesmo assim, percebe-se que uma viga que utilize o concreto como camada de revestimento apresenta parâmetros de durabilidade próximos a F2, através do ensaio de migração de cloretos.

A técnica de migração de cloretos é importante na avaliação da capacidade do revestimento de concreto ou compósito em proteger a armadura dos agentes deletérios. Isso porque, devido à maneira como o teste é executado, estão envolvidos os principais mecanismos de transporte de íons cloro, ou seja, a permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração iônica.

4.4.3 Resistividade elétrica

A Tabela 24 apresenta os resultados de resistividade elétrica média e classificação das misturas F0, F2, F4 e F6. Desse modo, percebe-se que a resistividade elétrica dos compósitos F2, F4 e F6, em relação a F0, diminuiu à medida que foi aumentado os teores de fibras. Isso pode ter ocorrido pelo fato de as fibras aumentarem a porosidade do compósito, conforme Kakooei *et al.* (2012), Söylev e Özturan (2014) e os resultados de absorção por imersão e por capilaridade, resultando no aumento da condutividade dos compósitos, em relação à mistura sem fibras. É válido afirmar que a elevação da condutividade elétrica devido ao aumento da quantidade de fibras favorece a penetração de agentes agressivos (SONG *et al.*, 2018).

Tabela 24 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica e classificação das misturas F0, F2, F4 e F6.

Mistura	Resistividade elétrica (kΩ.cm)	Risco de corrosão (CEB-192)	Risco de corrosão (COST 509)	Penetração de cloretos (AASHTO TP 95)
F0	34,21 (0,29)	Desprezível	Moderado	Fraca
F2	28,70 (0,82)	Desprezível	Moderado	Fraca
F4	23,08 (1,04)	Desprezível	Moderado	Fraca
F6	18,73 (0,65)	Baixo	Moderado	Moderada

Nota: Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: (O AUTOR).

A resistividade elétrica é uma propriedade que tem relação com os seguintes mecanismos de transporte: permeabilidade de fluidos e difusão de íons pelos poros do material. Dessa maneira, os íons cloro, por exemplo, podem passar tanto pela zona de transição entre a fibra e a matriz, quanto pelo lúmen, já que as fibras possuem natureza hidrofílica e absorvem água. Além disso, o comportamento diferente entre as misturas avaliadas na Tabela 24 que mostra a condução de corrente elétrica ocorre também através dos poros contínuos preenchidos com água presentes nos compósitos. Observa-se que o aumento dos percentuais de fibras, juntamente com a presença de água, criou caminhos condutores e diminuiu a resistividade elétrica (FIALA *et al.*, 2016). Essa propriedade analisada nos compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal também tem relação com a estrutura interna e a composição química de fibras (KOZŁOWSKI; WŁADYKA-PRZYBYLAK, 2008).

As Normas CEB-192 (FIB, 1989), CE-COST 509 (COST, 1997) e AASHTO TP 95 (AASHTO, 2011) são utilizadas para classificar o concreto quanto ao risco de corrosão e penetração de cloretos, com base em resultados de resistividade elétrica. A Tabela 24 apresenta a classificação das misturas analisadas conforme os limites estabelecidos por essas normas.

Na Tabela 24, apesar dos valores médios de resistividade elétrica de F2, F4 e F6 serem inferiores aos de F0, todos os compósitos contendo fibras de sisal apresentaram valores superiores ao limite que consideram altas probabilidades de corrosão conforme regulamentam: a Norma CEB-192 (FIB, 1989) (< 5 kΩ.cm); o Boletim Europeu COST 509 (COST, 1997) (< 10 kΩ.cm); e a Norma americana AASHTO TP 95-

14 (AASHTO, 2011) ($< 12 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$). Desse modo, se a presença das fibras de sisal não dificulta a ocorrência da corrosão, também não pode ser considerada prejudicial.

A resistividade elétrica é utilizada para monitorar estruturas de concreto armado e, através da heterogeneidade do material, é um indicativo de durabilidade. Diante dos resultados apresentados, afirma-se que uma viga de concreto armado que utilize a fôrma permanente produzida em compósito reforçados com fibras de sisal nos teores de 2%, 4% e 6%, permite a entrada de agentes agressivos, em relação à matriz de argamassa (0%), de acordo com as formulações desenvolvidas nessa pesquisa.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram avaliados compósitos com fibras curtas de sisal, que têm sido utilizados na produção de fôrmas permanentes para vigas de concreto armado, com o objetivo de avaliar o efeito do teor dessas fibras sobre os parâmetros de durabilidade de compósitos sisal-cimento, utilizados na produção de fôrmas permanentes para vigas. Desse modo, a partir dos resultados obtidos na presente pesquisa, é possível concluir que:

- O índice de vazios, a absorção de água por imersão, a densidade aparente e a absorvidade dos compósitos sisal-cimento aumentaram conforme a adição de 2%, 4% e 6% de fibras de sisal;
- Os valores encontrados de velocidade de onda ultrassônica foram suficientes para analisar a influência do teor de fibras de sisal, em que a matriz de argamassa e os compósitos, apesar de serem materiais diferentes, foram considerados todos de mesma qualidade;
- Os valores da resistência à compressão axial e dos módulos de elasticidade estático e dinâmico das fôrmas reduziram, em relação ao teor de 2%, respectivamente, cerca de 14%, 18,5% e 3%, com a elevação dos percentuais de fibras de sisal;
- O limite de proporcionalidade e as tensões equivalentes e residuais aumentaram, respectivamente, em média, 14%, 121% e 93% a partir da adição de 4% e 6% de fibras de sisal, em relação ao compósito com 2% de fibras;
- Os melhores parâmetros de durabilidade encontrados, entre os compósitos analisados, foram correspondentes à mistura com 2% de fibras de sisal, e há uma proximidade com o concreto de cobrimento;
- Diante dos parâmetros de físicos, mecânicos e de durabilidade é possível utilizar o compósito sisal-cimento com 4% de fibras na produção de fôrmas permanentes;
- Embora a utilização das fôrmas permanentes possa facilitar as questões mecânicas, sustentáveis e gestão no canteiro de obras, elas devem ser utilizadas com a expectativa de substituição parcial do cobrimento das armaduras.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os elementos construtivos produzidos a partir de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal tem elevado potencial, principalmente, ambiental, cujo o desafio para seus aperfeiçoamentos dependem da continuidade em outras pesquisas. Dentro dos diversos estudos que ainda precisam ser desenvolvidos e aprofundados, sugerem-se os seguintes tópicos:

- Estudar o efeito da adição de menores teores de fibras (abaixo de 2%) nos compósitos com fibras de sisal;
- Submeter os compósitos com fibras de sisal a ciclos de secagem e umedecimento (envelhecimento acelerado);
- Realizar o ensaio de estanqueidade à pressão positiva e negativa nos compósitos sisal-cimento;
- Utilizar técnicas eletroquímicas, que possibilitem de mensurar a intensidade e a taxa de corrosão em vigas de concreto armado que utilizem a fôrma permanente de compósitos sisal-cimento;
- Realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos compósitos, nos teores de 2%, 4% e 6%, que correspondem à fôrma permanente;
- Verificar a viabilidade financeira do uso da fôrma permanente em vigas de concreto armado.

7 REFERÊNCIAS

ABRYCKI, Maciej; ZAJDZINSKI, Arkadiusz. **Effect of fibres on corrosion of steel reinforcement**. 2012. 93 f. Master of Science Thesis (Master's in the Structural Engineering) – Programme Structural Engineering and Building Performance Design, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2012.

ABREU, Luiz Antônio Lobo de. **Uso de fôrmas permanentes de placas de argamassa armada em pontes vicinais**. 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Programa Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

AFROUGHSAKET, V.; OZBAKKALOGLU, T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 73-82, 2015.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A. Developments on vegetable fibre–cement-based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p.527-536, 2005.

ALBUQUERQUE, A. T.; EL DEBS, M. K. Levantamento dos sistemas estruturais em concreto pré-moldado para edifícios no Brasil. In: **1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado**, 2005, São Carlos. Anais... São Carlos: EESC/USP, 2005.

ALMEIDA, A. E. F. D. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F. D.; SAVASTANO JR., H. Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 233-246, 2010.

ALMEIDA, A. E. F. D. S.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F. D.; SAVASTANO JR., H. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p. 49-58, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 347-04**: Guide to formwork for concrete. Farmington Hills: ACI, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1018**: Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber-reinforced concrete. West Conshohocken: ASTM, 1997.

_____. **ASTM C876**: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken: ASTM, 1998.

_____. **ASTM E562**: Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. West Conshohocken: ASTM, 1999.

_____. **ASTM C1556**: Standard test method for density and unit weight of soil in place by the sand-cone method. West Conshohocken: ASTM, 2000.

_____. **ASTM C597-09**: Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken: ASTM International: ASTM, 2016.

_____. **ASTM C1202**: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. West Conshohocken: ASTM, 2018.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP95**: Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, DC: AASHTO, 2011.

AMORIM JÚNIOR, N. S.; SILVA, G. A.; DIAS, C. M.; RIBEIRO, D. V. Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 108-118, 2019.

ANDRADE, M. C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements, **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 724-742, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais - desempenho - parte 2: requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto armado - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 8522**: Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AZEVEDO, A. R.; MARVILA, M. T.; ZANELATO, E. B.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; CECCHIN, D. Development of mortar for laying and coating with pineapple fibers. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 187-193, 2020.

AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; SALGADO, A. L. D. B.; ZULLO, M. A. T. Caracterização tecnológica de híbridos de sisal. **Bragantia**, v. 48, n. 1, p. 113-124, 1989.

BAEZA, F. J.; GALAO, O.; ZORNOZA, E.; GARCÉS, P. Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites. **Materials & Design**, v. 51, p. 1085-1094, 2013.

- BALASUBRAMANIAN, M.; SENTHILSELVAN, S.; SABARISH, K. V. Experimental studies of sisal fiber in Portland cement concrete elements on durability. **Advances in Natural and Applied Sciences**, v. 10, n. 4, p. 455-460, 2016.
- BALLESTEROS, J.E.M.; SANTOS, V.; MARMOL, G.; FRIAS, M.; FIORELLI, J. Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications. **Cellulose**, v.24, pg. 2275-2286, 2017.
- BANTHIA, N.; BHARGAVA, A. Permeability of stressed concrete and role of fiber reinforcement. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 1, p. 70, 2007.
- BARIN, Daniel Sacchet. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Programa Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- BHARGAVA, A.; BANTHIA, N. Permeability of concrete with fiber reinforcement and service life predictions. **Materials and Structures**, v. 41, n. 2, p. 363-372, 2008.
- BENAICHA, M.; JALBAUD, O.; ALAOUI, A. H.; BURTSCHHELL, Y. Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 702-709, 2015.
- BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites**. 1 ed. Florida: Crc Press, 2007. 625 p.
- BERROCAL, C. G.; LUNDGREN, K.; LÖFGREN, I. Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: state of the art. **Cement and Concrete Research**, v. 80, p. 69-85, 2016.
- BERTOLINI, Luca; ELSENER, Bernhard; PEDEFERRI, Pietro; POLDER, Rob. **Corrosion of steel in concrete; prevention, diagnosis, repair**. 1 ed. Berlin: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. 434 p.
- BOLAT; H., ŞİMŞEK, O.; ÇULLU, M.; DURMUŞ, G.; CAN, Ö. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 61, p. 191-198, 2014.
- BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.
- BONATO, Marcelle Maia. **Desempenho mecânico e ambiental de concretos e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais, orgânicas e fotocatalíticas**. 2014. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. C.; PINTO, E. B. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.
- BRITISH STANDARDS, **EN 12504-PART 4**: Testing concrete - determination of ultrasonic pulse velocity. London: BS, 2004.
- BROOMFIELD, John P. **Corrosion of steel in concrete understanding investigation and repair**. 2ed. London: Taylor & Francis, 2006. 296 p.

CAMPOS, Rafael do Nascimento. **Avaliação da durabilidade em concretos com adição de cinza de biomassa com elevado teor de álcalis**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2015.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, G. C (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2010, vol.1, p. 893-943.

CARRARO, Cristine Grasselli. **Tratamento de fibras de bambu com polipropileno para utilização em concreto estrutural**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. 2 ed. Goiânia: PINI e UFG, 1997. 237p.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber – Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1411-1420, 2001.

CASTOLDI, R.S.; SOUZA, L. M. S.; DE ANDRADE SILVA, F. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 617-628, 2019.

CÉLINO, A.; FRÉOUR, S.; JACQUEMIN, F.; CASARI, P. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review. **Frontiers in Chemistry**, v. 1, p. 43, 2014.

CIFUENTES, H.; GARCÍA, F.; MAESO, O.; MEDINA, F. Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low, normal and high-strength FRC. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 130-137, 2013.

CHOUSIDIS, N.; RAKANTA, E.; IOANNOU, I.; BATIS, G. Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 810-817, 2015.

COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON e FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎTE. **Model Code for Service Life Design**. Lausanne: CEB-FIP, 2006.

_____. **Model Code 2010**. CEB Bulletin n. 65 e 66. Lausanne: CEB-FIP, 2011.

CORREIA, V. C.; SANTOS, S. F.; TONOLI, G. H. D.; SAVASTANO JR, H. Characterization of vegetable fibers and their application in cementitious composites. In: **Nonconventional and Vernacular Construction Materials**. Woodhead Publishing, 2016. p. 83-110.

CORREIA, V. C.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V. M. Utilization of vegetable fibers for production of reinforced cementitious materials. **RILEM Technical Letters**, v. 2, p. 145-154, 2017.

COST 509, 'Corrosion and protection of metals in contact with concrete', Final report, Eds. R.N. Cox, R. Cigna, O. Vennesland, T. Valente, European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN, ISBN 92-828-0252-3, (1997) 148 pp.

COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. 1988. 237 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DAWOOD, E. T.; RAMLI, M. Durability of high strength flowing concrete with hybrid fibres. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 521-530, 2012.

DE GUTIÉRREZ, R. M.; DIAZ, L. N.; DELVASTO, S. Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 593-598, 2005.

DE SUTTER, S.; REMY, O.; TYSMANS, T.; WASTIELS, J. Development and experimental validation of a lightweight stay-in-place composite formwork for concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 33-39, 2014.

DILONARDO, I.; VARHEN, C.; LEE, C.; FIGUEIREDO, A., Avaliação Metodológica da Medida de Carbonatação em Microconcretos. In: **57º IBRACON Congresso Brasileiro Do Concreto**, 2015, Bonito – MS. Anais... Bonito: CBC, 2015.

DIAMOND, S. (1999). Unique response of LiNO_3 as an alkali silica reaction-preventive admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1271-1275.

EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 456 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13295**. Products and systems for the protection and repair of concrete structures: test methods: determination of resistance to carbonation. Brussels: CEN, 2004.

FAGURY, Régia Vânia Guilliod. **Avaliação de fibras naturais para a fabricação de compósitos: açai, coco e juta**. 2005. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

FAHMY, Ezzat H.; ZEYD, M. N. A.; SHAHEEN, Y. B. S.; ABDELNABY, A. A. Permanent ferroceement forms: A viable alternative for construction of concrete beams. In: **30 Conference on Our World In Concrete & Structure**, 2005, Singapura: CI-PREMIER PTE LTD, 2005.

FAHMY, E. H.; SHAHEEN, Y. B.; ABDELNABY, A. M.; ZEID, M. N. A. Applying the ferroceement concept in construction of concrete beams incorporating reinforced mortar permanent forms. **International Journal of Concrete Structures and Materials**. v. 8, n. 1, p. 83-97, 2014.

FAROOQ, A.; SALEEM, A.; AHMAD, R. Effect of Coconut Fibre on the Mechanical and Corrosion Properties of Reinforced Concrete in Marine Environment. **Journal of Steel Structures & Construction**. v. 3, 2017.

- FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in polymer science**, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.
- FERRARA, L.; FERREIRA, S. R.; KRELANI, V.; LIMA, P.; SILVA, F.; TOLEDO FILHO, R. D. Cementitious composites reinforced with natural fibres. In: **Recent Advances on Green Concrete for Structural Purposes**. Springer, Cham, 2017. p. 197-331.
- FERREIRA, S. R.; LIMA, P. R. L.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de ciclos de molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Revista Matéria**, v. 17, n. 2, 2012.
- FERREIRA, S. R.; SILVA, F. A.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**. v. 139, p. 551-561, 2017.
- FIALA, L.; TOMAN, J.; VODIČKA, J.; RÁČEK, V. Experimental study on electrical properties of steel-fibre reinforced concrete. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 241-248, 2016.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. FIB-CEB 192. Diagnosis and assessment of concrete structures – State-of-Art Report (1989)
- FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 255 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- FRAZÃO, C.; CAMÕES, A.; BARROS, J.; GONÇALVES, D. Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 155-166, 2015.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 376 p.
- GJØRV, Odd. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. Tradução Enio Pazini Figueiredo e Paulo Roberto do Lago Helene. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 240 p.
- GONÇALVES, Stephanie Assunção. **Uso da fibra de coco em betão**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.
- HALL, C. Water absorption of mortars and concretes: a review. In: **Magazine of Concrete Research**, v. 41, nº 147, p. 51-61, 1989.
- HALL, C., TSE, T.K.M. Water movement in porous building materials – VII. The sorptivity of mortars. **Building and Environment**, v. 21, n. 2, p. 113-118, 1986.
- HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Corrosão de armaduras no concreto**. São Paulo: PINI, 1986. 47 p.
- HENRIQUES, Thiago dos Santos. **Análise da influência da fibra óptica polimérica inserida em blocos de argamassa**. 2013. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- HIDAYA, N.; MUTUKU, R. N.; MWERO, J. N. Physical and Mechanical Experimental Investigation of Concrete incorporated with Polyethylene Terephthalate (PET) Fibers. **European International Journal of Science and Technology**, v. 6, p. 31-41, 2017.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1923-1930, 2002.

HUANG, B. T.; LI, Q. H.; XU, S. L.; LI, C. F. Development of reinforced ultra-high cementitious composite permanent formwork: experimental study and digital image correlation analysis. **Composite Structures**, v. 180 p. 892-903, 2017

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 1920-12**: Testing of concrete – part 12: determination of the carbonation resistance of concrete – accelerated carbonation method. Geneva: ISO, 2015.

ISAIA, Geraldo Cechella. et al. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2005. 1579 p.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate polymers**, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008.

KABIR, M. M.; WANG, H.; LAU, K. T.; CARDONA, F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: an overview. **Composites: Part B**, v. 43, pp. 2883 – 2892, 2012.

KANG, S. H.; HONG, S. G.; KWON, Y. H. Effect of permanent formwork using ultra-high-performance concrete on structural behavior of reinforced concrete beam subjected to bending as a function of reinforcement parameter. **Journal of Applied Mechanical Engineering**. v. 6, n. 2, 2017.

KAKOOEI, S., AKIL, H. M.; JAMSHIDI, M.; ROUHI, J. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 73-77, 2012.

KHUSHNOOD, R. A.; MUHAMMAD, S.; AHMAD, S.; TULLIANI, J. M.; QAMAR, M. U.; ULLAH, Q.; KHAN, S. A.; MAQSOM, A. Theoretical and experimental analysis of multifunctional high-performance cement mortar matrices reinforced with varying lengths of carbon fibers. **Materiales de Construcción**, v. 68, n. 332, p. 172, 2018.

KIM, B.; BOYD, A. J.; KIM, H. S.; LEE, S. H. Steel and synthetic types of fibre reinforced concrete exposed to chemical erosion. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 720-728, 2015.

KIRTHIKA, S. K.; SINGH, S. K.; SURYA, M. Durability studies on basalt fiber reinforced concrete. **Indian Concrete Journal**, v. 92, n. 4, p. 45-55, 2018

KOSKELA, Lauri. **Application of the new production philosophy to construction**. Stanford: Stanford University, 1992.

KOZŁOWSKI, R.; WŁADYKA-PRZYBYLAK, M. Flammability and fire resistance of composites reinforced by natural fibers. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 19, n. 6, p. 446-453, 2008.

KUMAR, P.P; KUMAR, H.R.; SAI, P; JAKETIA, A; ACHHA, A.; SONI, L. (2017). A Study on Durability of Sisal Fibre Reinforced Concrete Composites. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**. V. 7, p. 272-281.

LAMEIRAS, R.; BARROS, J.; AZENHA, M. Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC). **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 60-76, 2015.

LEITE, Dimas Delgado. **Fôrma permanente pré-fabricada em compósito cimentício reforçado com fibra de sisal para moldagem de viga de concreto armado**. 2019. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019.

LEUNG, C. K. Y.; CAO, Q. Development of pseudo-ductile permanent formwork for durable concrete structures. **Materials and Structures**. v. 43, p. 993-1007, 2010.

LI, M.; KHELIFA, M.; KHENNANE, A.; EL GANAOU, M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. **Composite Structures**, v. 209, p. 13-22, 2019.

LIMA, Paulo Roberto Lopes. **Análise da durabilidade de estruturas de concreto armado**. 1996. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

LIMA, P.R.L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2004. 287 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; LIMA, J. M. F. Mecanismo de fissuração sob tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. **Engvista**, v. 15, n. 1, p. 95-103, 2013.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; MELO FILHO, J. A. Compressive stress-strain behaviour of cement mortar-composites reinforced with short sisal fibre. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 38-46, 2014.

LIMA, A. I. N.; CRUZ, C. B.; SILVA, E. L. Impactos Provocados no Meio Ambiente Pelo uso da Madeira na Construção Civil. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Edição 03. Ano 02, Vol. 01. pp 116-135, 2017.

LIMA, P. R. L.; SANTOS, H. M.; CAMILLOTO, G. P.; CRUZ, R. S. Effect of surfasse biopolymeric treatment on sisal fiber properties and fiber-cement bond. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v.12, n.2, 2017.

LIMA, P. R. L.; ROQUE, A. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, J. M. F.; BARROS, J. A. O. Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 620-634, 2018.

MAGALHÃES, M. S.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Influence of local raw materials on the mechanical behavior and fracture process of PVA-SHCC. **Materials Research**, v.17, n.1, pg. 146-156, 2014.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1476-1484, 2009.

MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; FIGURA, A. S.; TISSOT, F. M.; ARTIOLI, K. A. Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato. **Revista Matéria**, v. 20, p. 145-159, 2015.

MEGIATTO JR., Jackson Dirceu. **Fibras de Sisal: Estudo de propriedades e modificações químicas visando a aplicação em compósitos de matriz fenólica**. 2006. 271 f. Tese (Doutorado em Ciências Físico-químicas) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MELO FILHO, João Almeida. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de Compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. 2012. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MENDES, Marcus Vinícius Araújo da Silva. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. 2009. 200 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 674p.

MIAO, Y. Y.; NIU, D. T.; WANG, Y. Steel Fiber Reinforced Concrete Carbonation Simulation Research. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications, 2011. p. 108-111.

MONTEMOR, M. F.; CUNHA, M. P.; FERREIRA, M. G.; SIMÕES, A. M. (2002). Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 1, p. 45-53.

MOTA, Daniel Andrade. **Influência da adição de materiais pozolânicos na corrosibilidade do concreto armado, analisada por meio do potencial de corrosão e resistividade elétrica**. 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

NAZAR, Nilton. **Fôrmas e escoramentos para edifícios: critérios para dimensionamento e escolhas para o sistema**. 1 ed. São Paulo: Pini, 2007. 174 p.

NEVES JUNIOR, Alex; **Captura de CO₂ em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. 2014. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

NEVES JUNIOR, A.; TOLEDO FILHO, R. D.; DWECK, J.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. A study of CO₂ capture by high initial strength Portland cement pastes at early curing stages by new non-conventional thermogravimetry and non-conventional differential thermal analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, n. 3, p. 1341-1352, 2017.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 5 ed. Tradução Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre: Bookman, 2015. 912 p.

NILI, M.; AFROUGHSABET, V. Property assessment of steel–fibre reinforced concrete made with silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 664-669, 2012a.

NILI, M.; AFROUGHSABET, V. The long-term compressive strength and durability properties of silica fume fiber-reinforced concrete. **Materials Science and Engineering: A**, v. 531, p. 107-111, 2012b.

NILSSON, L.; ANDERSEN, A.; LUPING, T.; UTGENANNT, P. Chloride ingress data from field exposure in Swedish road environment. In: Second International Rilem Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, 2000, Paris. **Anais...** Paris: 2000, 12p.

NORDTEST. **NT Build 492**. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration experiments. Espoo: NORDTEST, 1999.

OKEOLA, A. A.; ABUODHA, S. O.; MWERO, J. Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete. **Fibers**, v. 6, n. 3, 2018.

PARAMASIVAM, S.; RAMESHKUMAR, M.; MALATHY, R.; PRAKASH, C. Study of the Flexural Behaviour of Warp Knitted Reinforced Ferrocement Composites. **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, 2019.

PEREIRA, C. H. A. F.; FIGUEIREDO, E. J. P.; BAUER, E. Avaliação da Influência da Adição de Fibras Sintéticas ao Concreto Quanto ao Ingresso de Íons Cloretos. 164 SEMINÁRIO EM ENGENHARIA OCEÂNICA - SEMENGO. Rio Grande: FURG. 2005. p.16.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. Ensaio de "Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. vol.5 n.6 São Paulo, 2012.

PINTO, Silas de Andrade. **Correlações entre ensaios de penetração de cloretos e análise da influência do uso da microssílica na durabilidade do concreto armado**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

PIZZOL, V. D.; MENDES, L. M.; FREZZATTI, L.; SAVASTANO JR., H.; TONOLI, G. H. D. Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites. **Minerals Engineering**, v. 59, p. 101-106, 2014.

PRIYA, S. T.; THIRUMALINI, S. Evaluation of strength and durability of natural fibre reinforced high strength concrete with m-sand. **Revista Romana de Materiale**, v. 48, n. 4, p. 483-490, 2018.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RAHMANI, T.; KIANI, B.; SAMI, F.; FARD, B. N.; FARNAM, Y.; SHEKARCHIZADEH, M. Durability of glass, polypropylene and steel fiber reinforced concrete. In: **Proceedings of the International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal**. 2011. p. 12-15.

RAMLI, M.; KWAN, W. H.; ABAS, N. F. Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 554-566, 2013.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX. **CPC-18**. Measurement of hardened concrete carbonation depth. Materials and Structures. RILEM, 1988.

_____. **TC 162-TDF**. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: σ - ε design method: final recommendation. materials and structures. RILEM, 2002.

RIBEIRO, Daniel Vêras. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. 2010. 259 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

RIBEIRO, D.V.; ALMEIDA, F. C.R.A.; CUNHA, M.P.T.; HELENE, P.R.L.; LOURENÇO, M.Z.; SALES, A.; DE SOUSA, C.A.C. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018. 370p.

ROQUE, Alex Borges. **Elemento construtivo de fibrocimento contendo resíduo de concreto e fibra de sisal para uso como enchimento de lajes pré-moldadas**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2015.

SANTOS, R. J.; LIMA, P. R. L. Aderência fibra-matriz em compósitos à base de cimento reforçados com dois tipos de resíduo de sisal. In: **Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil**, 3, 2013, São Leopoldo. Anais eletrônicos... Porto Alegre: ANTAC, 2013.

SANTOS, Daniele Oliveira Justo dos. **Influência da areia reciclada na reologia de compósitos autoadensáveis reforçados com fibra de sisal**. 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2014.

SANTOS, F. M.; DE SOUZA, T. F.; BARQUETE, D. M.; AMADO, F. D. Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 315-323, 2016.

SANTOS, D. O. J.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

SANTOS, R. S. Energia incorporada na fase de pré-uso: comparação entre lajes steel deck e maciças. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 197-205, 2019.

SAPPAKITTIPAKORN, M.; BANTHIA, N. Corrosion of rebar and role of fiber reinforced concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 40, n. 1, p. 127-136, 2012.

SAVASTANO JR., H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 1, p.49-57, 1999.

SAVASTANO JR., Holmer. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: Reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 151 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 3, p. 311-319, 2003.

SHAH, V.; BISHNOI, S. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 219-232, 2018.

SILVA, C. G. **Fibras celulósicas têxteis em compósitos de matriz fenólica**. 2006. 176 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, F. G.; HELENE, P.; CASTRO-BORGES, P.; LIBÓRIO, J. B. L. Sources of variations when comparing concrete carbonation results. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 7, p. 333-42, 2009.

SILVA, Moisés Ferreira Eleutério. **Sorção de água em compósitos de poliéster reforçados com fibras de sisal tratadas com líquidos iônicos**. 2017a. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017a.

SILVA, Guilherme Augusto de Oliveira e. **Avaliação da durabilidade de concretos contendo agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC)**. 2017b. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017b.

SILVEIRA, Marina Vela. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal**. 2018. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SONG, Q.; YU, R.; SHUI, Z.; RAO, S.; WANG, X.; SUN, M., JIANG, C. Steel fibre content and interconnection induced electrochemical corrosion of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC). **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 191-200, 2018.

SÖYLEV, T. A.; ÖZTURAN, T. Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 67-75, 2014.

TAKATA, Leandro Teixeira. **Aspectos executivos e a qualidade de estruturas em concreto armado: estudo de caso**. 2009. 151 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

TASCA, Maisson. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Programa Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TAWAB, A. A.; FAHMY, E. H.; SHAHEEN, Y. B. Use of permanent ferrocement forms for concrete beam construction. **Materials and Structures**. v. 45, p. 1319-1329, 2012.

TAYLOR, Harry F. W. **Cement chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997. 480p.

TESSARO, A. B.; GONÇALVES, M. R. F.; GATTO, D. A.; POLLNOW, E. N.; CARREÑO, N. L. V.; DELUCIS, R. D. Á. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de eucalipto puras e tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%). **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 47-55, 2015.

THYAVIHALLI GIRIJAPPA, Y. G.; MAVINKERE RANGAPPA, S.; PARAMESWARANPILLAI, J.; SIENGCHIN, S. Natural fibers as sustainable and renewable resource for development of eco-friendly composites: a comprehensive review. **Frontiers in Materials**, v. 6, p. 226, 2019.

TOLEDO FILHO, R.D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G.L; SCRINEVER, K. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**. v.25, n.2, p.185 - 196, 2003.

TOLEDO FILHO, R. D.; SILVA, F. A.; FAIRBAIRN, E. M. R.; MELO FILHO, J. A. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2409-2420, 2009.

TONOLI, G.; SANTOS, S.; JOAQUIM, A.; SAVASTANO JR., H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 193-201, 2010.

TONOLI, G.H.D.; SANTOS, S.F.; SAVASTANO JR. H.; DELVASTO, S.; GUTIERREZ, R.M.; MURPHY, M.M.L. Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p.225-232, 2011.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 473 p.

VASANELLI, E.; MICELLI, F.; AIELLO, M. A.; PLIZZARI, G. Long term behavior of FRC flexural beams under sustained load. **Engineering Structures**, v. 56, p. 1858-1867, 2013.

YU, C. **The study of reinforced pseudo-ductile cementitious composite permanent formwork**. 2014. 250 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) – Hong Kong University of Science and Technology, 2014.

ZAMANZADEH, Z.; LOURENÇO, L.; BARROS, J. Recycled steel fibre reinforced concrete failing in bending and in shear. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 195-207, 2015.

ZEGA, C.J., DI MAIO, A.A. "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements". **Waste Management**, v.31, n, 11, Nov., pp. 2336-2340, 2011.

ZHANG, P.; LI, Q. F. Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. **Composites Part B: Engineering**, v. 45, n. 1, p. 1587-1594, 2013.