

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada  
Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**

**Fernanda Bianchi Pereira da Costa**

Porto Alegre  
2015

FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE  
DEFORMAÇÃO REFORÇADOS COM FIBRAS**

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

Porto Alegre  
2015

**FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA**

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE  
DEFORMAÇÃO REFORÇADOS COM FIBRAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de junho de 2015.

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

Prof. Armando Miguel Awruch  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande  
do Sul

**Prof. Paulo Roberto do Lago Helene (USP)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

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

**Profa. Mônica Regina Garcez (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, meus irmãos e ao meu amor, Marcelo, pelo carinho e compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por esta conquista e pelos benefícios que me foram concedidos; deles seria indigno se os atribuísse ao acaso dos acontecimentos ou ao meu próprio mérito.

A minha família, em especial aos meus pais, Alberto e Ana Beatriz, pela base, educação e dedicação constante. Agradeço a minha mãe, pelas horas ao telefone, diariamente, sempre disposta a ouvir pacientemente e compartilhar de cada momento, mesmo que distante. Agradeço também pelos conselhos, risadas e pelo companheirismo que a torna, acima de tudo, minha melhor amiga e confidente. Agradeço aos meus irmãos Rafael e Manoela, pelo carinho, amor, paciência e por se fazerem sempre presentes na minha vida. Agradeço, em especial, a minha irmã, minha parceira e, também, melhor amiga, por compartilhar sempre dos momentos bons e ruins das nossas vidas. Agradeço à minha segunda família, a qual fui abençoada junto com o amor da minha vida, Marcelo, por sempre me tratarem com muito amor e carinho e, também, pelo apoio em todos os momentos.

Agradeço imensamente ao amor da minha vida, Marcelo, meu melhor amigo e companheiro, pela paciência, carinho, amor, respeito e dedicação. Faltam-me palavras para descrever a pessoa maravilha que és e o quanto representa para mim. Agradeço por me compreender, incentivar e ajudar na realização deste trabalho (e por corrigir o meu inglês!). Enfim, te agradeço, acima de tudo, por estar ao meu lado sempre e me fazer feliz todos os dias!

Ao meu orientador Prof. Luiz Carlos, pela orientação, apoio e incentivo na realização deste trabalho. Agradeço, mesmo em meio aos seus dias atarefados, por me ouvir, ajudar e discutir sempre sobre novas soluções e ideias. Agradeço também pela amizade, confiança e, acima de tudo, pela oportunidade em desenvolver esta pesquisa.

A minha orientadora de coração e amiga Prof.<sup>a</sup> Ângela, pela orientação, paciência e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por sempre me ouvir, incentivar, aconselhar e pelo suporte em todos os momentos desta pesquisa, mesmo no desânimo quando as coisas davam errado. Com certeza, sua ajuda foi essencial para esta realização, assim como para o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço, especialmente, a minha grande amiga Débora Righi que, desde o início, me auxiliou e acompanhou durante toda a pesquisa. Obrigada por me ajudar a colocar a mão na massa, pelos momentos de risadas, pelas tristezas, pelas conquistas juntas, pela alegria quando

algo dava certo e, também, por ir ao laboratório em dias que nem precisava só para me ajudar e fazer companhia. Espero que da mesma forma eu tenha contribuído para a realização do teu trabalho. Acima de tudo, obrigada pela amizade que estabelecemos e que, com certeza, levaremos para vida toda.

Ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), que passou a ser a minha segunda casa, assim como o grupo se tornou uma grande família. Agradeço aos bolsistas de Iniciação Científica (Lívia, Vitor, Lucas, Giovane, Michael, Gabriel e Vinícius) que me auxiliaram com dedicação e, em especial, a Taís, que se tornou uma amiga muito especial. Agradeço, também, aos demais colegas e bolsistas pelo auxílio quando precisei e pelos momentos de confraternização.

Agradeço de coração ao Sr. José, grande auxiliar do LEME, que sempre esteve disposto a auxiliar no que fosse preciso e com muito bom humor. Agradeço também ao Sr. Fontes e Sr. Edgar, pelo suporte nos equipamentos e instalações necessárias.

A CAPES e ao CNPq pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação a esta pesquisa.

A empresa CAAL (Alegrete/RS) pelo fornecimento da cinza de casca de arroz.

Enfim, agradeço aos meus amigos (Tamara, Reji, Douglas) e familiares pelos momentos de felicidade, confraternização e, também, de colaboração para meu crescimento pessoal.

Só é útil o conhecimento que nos torna melhores.

*Sócrates*

## RESUMO

PEREIRA DA COSTA, F.B. Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Apesar do avanço tecnológico crescente na construção civil, a falta de durabilidade das estruturas de concreto, tanto em edificações como pavimentação, tem sido constatada com acentuada assiduidade e proporção. O compósito cimentício de elevada deformação, também conhecido como *Engineered Cementitious Composites (ECC)*, foi difundido a partir do conceito de concretos de alto desempenho reforçado com fibras, visando suprir o comportamento frágil do concreto convencional e problemas relacionados à falta de durabilidade gerada, principalmente, devido à propagação de fissuras. Neste contexto, o Laboratório de Ensaio de Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) consolidou, nos últimos cinco anos, um grupo de pesquisa voltado ao estudo do *ECC* aliado a utilização de materiais nacionais. A concepção tem sido baseada na aplicação de materiais que proporcionem custos mais baixos e fomentem questões de sustentabilidade ambiental. Assim, foram incorporados ao material, fibra de polipropileno (2% em volume) e substituição parcial do cimento por 30% (em volume) de cinza de casca de arroz residual. O presente trabalho visa analisar questões de durabilidade destes compósitos (com e sem a incorporação de cinza), e compará-los a concretos convencionais, através de ensaios relacionados ao estudo da estrutura de poros (absortividade, absorção e índice de vazios, absorção e água por capilaridade, absorção de água pelo método do cachimbo e microscopia eletrônica de varredura), penetração e difusão de íons cloretos, retração livre e restringida, e, por fim, resistência à abrasão. Os resultados obtidos indicam que a incorporação de cinza de casca de arroz melhorou significativamente as propriedades do compósito relacionadas à conexão e solução dos poros, dificultando a passagem de cloretos, além de apresentar resistência à abrasão semelhante ao compósito de referência. Sua desvantagem está relacionada às maiores aberturas de fissuras ocasionadas devido à retração restringida. Entretanto, o trabalho evidencia a viabilidade e vantagem do uso de cinza de casca de arroz na produção do compósito, em termos de durabilidade.

Palavras-chave: compósito cimentício; fibra de polipropileno; cinza de casca de arroz; durabilidade.

## **ABSTRACT**

PEREIRA DA COSTA, F.B. Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Despite the increasing technological advances in construction, the lack of concrete structures durability, both in buildings and pavement, have been found with severe attendance and proportion. The high strain cementitious composite, also known as Engineered Cementitious Composites (ECC), was widespread from the concept of high performance fiber reinforced concrete, in order to supply the fragile behavior of conventional concrete and problems related to lack of durability generated mainly due to crack propagation. In this context, the Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) consolidated over the last five years, a research group focused on the ECC study allied with the use of national materials. The design has been based on the application materials that provide lower costs and promote environmental sustainability issues. Thus, they were incorporated into the material polypropylene fibers (2% by volume) and partial cement replacement of 30% (by volume) of residual rice husk ash. This study aims to examine durability issues of these composites (with and without rice husk ash), and compare them to conventional concretes, through tests related to the study of pore structure (absorptivity, absorption and void ratio, water absorption by capillarity, water absorption by the pipe method and scanning electron microscopy), penetration and diffusion of chloride ions, free and restrained shrinkage, and, finally, abrasion resistance. The results indicate that the incorporation of rice husk ash significantly improved material properties related to connection and pores solution, hindering the chloride ingress, and presents abrasion resistance similar to the reference composite. Its disadvantage is related to the larger cracks due to restrained shrinkage. However, the work demonstrates the viability and advantage of use rice husk ash in the composite production in terms of durability.

Key-words: cementitious composites; polypropylene fiber; rice husk ash; durability.

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>19</b> |
| 1.1      | CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....  | 19        |
| 1.2      | JUSTIFICATIVA .....   | 20        |
| 1.3      | OBJETIVOS .....   | 22        |
| 1.3.1    | Objetivo Geral .....  | 22        |
| 1.3.2    | Objetivos Específicos .....   | 23        |
| 1.4      | DELINEAMENTO DA PESQUISA .....  | 23        |
| 1.5      | ESTRATÉGIA DE PESQUISA .....  | 24        |
| 1.6      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....   | 25        |
| <b>2</b> | <b>ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE, CONCRETOS E<br/>COMPÓSITOS ESPECIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS .....</b>                   | <b>27</b> |
| 2.1      | DURABILIDADE E DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO .....   | 27        |
| 2.2      | DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS E COMPÓSITOS ESPECIAIS<br>REFORÇADOS COM FIBRAS .....  | 31        |
| 2.2.1    | Características gerais das fibras e interação fibra-matriz .....  | 31        |
| 2.2.2    | A evolução dos compósitos cimentícios reforçados com fibras .....   | 36        |
| 2.3      | COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA DEFORMAÇÃO REFORÇADOS<br>COM FIBRAS – <i>ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)</i> ..... | 38        |
| 2.3.1    | A incorporação de materiais cimentícios suplementares .....   | 40        |
| 2.3.2    | Avanços recentes sobre o estudo do ECC no Grupo de Pesquisa LEME .....  | 40        |
| 2.3.2.1  | Aplicação do compósito como material para recapeamento de pavimentos ....   | 41        |
| 2.3.2.2  | Caracterização mecânica do compósito com a utilização de cinza da casca de<br>arroz e fibras de polipropileno .....           | 41        |
| 2.4      | SÍNTESE DO CAPÍTULO .....   | 43        |
| <b>3</b> | <b>DURABILIDADE: ESTRUTURA DE POROS, MECANISMOS DE<br/>TRANSPORTE E DEGRADAÇÃO .....</b>                                      | <b>44</b> |
| 3.1      | ESTRUTURA DE POROS .....  | 44        |
| 3.1.1    | Mecanismos de transporte .....  | 47        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.1.1.1  | Permeabilidade .....  | 47        |
| 3.1.1.2  | Absorção .....  | 48        |
| 3.1.1.3  | Difusão .....   | 50        |
| 3.1.2    | A influência das fibras nos mecanismos de transporte.....         | 51        |
| 3.2      | <b>AÇÃO DE CLORETOS</b> .....                                     | 53        |
| 3.2.1    | Medição do ingresso de cloretos no concreto.....                  | 55        |
| 3.2.2    | Teor crítico de cloretos no concreto .....                        | 57        |
| 3.2.3    | A influência das fibras no ingresso de cloretos no concreto ..... | 58        |
| 3.3      | <b>RETRAÇÃO</b> .....   | 59        |
| 3.3.1    | O efeito das fibras e adições na retração do concreto.....        | 60        |
| 3.3.2    | Testes para medição da retração no concreto .....                 | 62        |
| 3.4      | <b>ABRASÃO</b> .....  | 63        |
| 3.4.1    | O efeito das fibras e adições na abrasão do concreto .....        | 64        |
| 3.4.2    | Testes para medição da abrasão no concreto.....                   | 65        |
| 3.5      | <b>SÍNTESE DO CAPÍTULO</b> .....                                  | 66        |
| <b>4</b> | <b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....                                | <b>67</b> |
| 4.1      | <b>VARIÁVEIS DA PESQUISA</b> .....                                | 67        |
| 4.2      | <b>ESPECIFICAÇÕES DOS TRAÇOS E PROCEDIMENTO DE MISTURA</b> .....  | 68        |
| 4.3      | <b>MATERIAIS EMPREGADOS</b> .....                                 | 69        |
| 4.3.1    | Cimento .....   | 70        |
| 4.3.2    | Cinza da casca de arroz (CCA).....                                | 70        |
| 4.3.3    | Agregado miúdo .....  | 72        |
| 4.3.3.1  | Areia fina .....  | 72        |
| 4.3.3.2  | Areia média.....  | 73        |
| 4.3.4    | Agregado graúdo .....   | 74        |
| 4.3.5    | Fibra de polipropileno .....                                      | 75        |
| 4.3.6    | Aditivos .....  | 75        |
| 4.4      | <b>MÉTODOS E ENSAIOS</b> .....                                    | 76        |
| 4.4.1    | Estrutura de poros .....  | 76        |
| 4.4.1.1  | Absortividade .....   | 76        |
| 4.4.1.2  | Absorção e índice de vazios .....                                 | 78        |
| 4.4.1.3  | Absorção de água por capilaridade.....                            | 79        |
| 4.4.1.4  | Ensaio de absorção de água pelo método do cachimbo .....          | 80        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.4.1.5  | Microscopia eletrônica de varredura .....                          | 81         |
| 4.4.2    | Ação de cloretos .....   | 82         |
| 4.4.2.1  | Penetração de cloretos .....                                       | 82         |
| 4.4.2.2  | Difusão de cloretos .....  | 84         |
| 4.4.3    | Retração .....   | 85         |
| 4.4.3.1  | Retração livre.....  | 85         |
| 4.4.3.2  | Retração restringida.....  | 86         |
| 4.4.4    | Abrasão.....   | 88         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                               | <b>90</b>  |
| 5.1      | ESTRUTURA DE POROS .....   | 90         |
| 5.1.1    | Absortividade .....  | 90         |
| 5.1.2    | Absorção e índice de vazios .....                                  | 94         |
| 5.1.3    | Absorção de água por capilaridade.....                             | 96         |
| 5.1.4    | Absorção de água pelo método do cachimbo .....                     | 99         |
| 5.1.5    | Síntese dos resultados .....                                       | 100        |
| 5.2      | AÇÃO DE CLORETOS .....   | 102        |
| 5.2.1    | Penetração de cloretos .....                                       | 102        |
| 5.2.2    | Difusão de cloretos .....  | 106        |
| 5.3      | RETRAÇÃO.....  | 109        |
| 5.3.1    | Retração livre.....  | 109        |
| 5.3.2    | Retração restringida.....  | 111        |
| 5.4      | ABRASÃO .....  | 122        |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                   | <b>125</b> |
| 6.1      | CONCLUSÕES .....   | 125        |
| 6.2      | RESPOSTAS ÀS PERGUNTAS .....                                       | 129        |
| 6.3      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                              | 131        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>133</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – VALORES DE GANHO DE MASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO –</b> |            |
|          | <b>ENSAIO DE ABSORTIVIDADE .....</b>                               | <b>149</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>APÊNDICE B – RESULTADOS DA TAXA DE ABSORÇÃO E RESISTÊNCIA<br/>CAPILAR – ENSAIO DE ABSORTIVIDADE .....</b>     | <b>153</b> |
| <b>APÊNDICE C – RESULTADOS DE ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS .....</b>  | <b>155</b> |
| <b>APÊNDICE D – RESULTADOS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE .....</b>  | <b>157</b> |
| <b>APÊNDICE E – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE PELO MÉTODO DO<br/>CACHIMBO .....</b>                                  | <b>160</b> |
| <b>APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS<br/>CLORETOS – CORRENTES E CARGAS ELÉTRICAS .....</b> | <b>163</b> |
| <b>APÊNDICE G – RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO LIVRE.....</b>  | <b>166</b> |
| <b>APÊNDICE H – GRÁFICOS DE REGRESSÃO LINEAR – ENSAIO DE RETRAÇÃO<br/>RESTRINGIDA .....</b>                      | <b>168</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma das etapas do trabalho.....  | 25 |
| Figura 2 – Relação entre durabilidade e desempenho (CEB, 1992).....  | 28 |
| Figura 3 – Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no Brasil: origem e incidências (CARMONA E MAREGA, 1988). ....                               | 30 |
| Figura 4 – Arranjos de fibras em uma, duas ou três dimensões (adaptado de BENTUR E MINDESS, 2007). ....  | 33 |
| Figura 5 – Reforço da fibra antes e depois da ocorrência de microfissuras (adaptado de BANTHIA, 1994).....   | 34 |
| Figura 6 – Diagrama tensão-deformação elástica de matriz cimentícia e fibra de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2011)..... | 35 |
| Figura 7 – Comparação da curva tensão x deformação entre FRC (a) e HPFRCC (b) sob tração direta (NAAMAN, REINHARDT, 2006).....                                     | 37 |
| Figura 8 – Classificação dos compósitos cimentícios reforçados com fibras (JSCE, 2008)....   | 38 |
| Figura 9 – Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características do ECC e de um concreto convencional (adaptado de SAHMARAN E LI, 2009). ....    | 39 |
| Figura 10 – Curva tensão-deformação dos compósitos sob tração direta (a) e flexão a quatro pontos (b) (RIGHI, 2015). ....  | 42 |
| Figura 11 – Classificação dos poros (adaptado de SETZER, 1977, <i>apud</i> CEB, 1992).....   | 45 |
| Figura 12 – Cinza de casca de arroz sem controle de queima. ....   | 71 |
| Figura 13 – Curva granulométrica da areia fina. ....   | 72 |
| Figura 14 – Curva granulométrica da areia média. ....  | 73 |
| Figura 15 – Curva granulométrica da brita.....   | 74 |
| Figura 16 – Fibra de polipropileno monofilamento.....  | 75 |
| Figura 17 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio de absortividade. ....  | 78 |
| Figura 18 – Execução do ensaio de absortividade.....   | 78 |
| Figura 19 – Execução do ensaio de absorção e índice de vazios. ....  | 79 |
| Figura 20 – Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade.....   | 80 |
| Figura 21 – Execução do ensaio de absorção de água pelo método do cachimbo. ....   | 81 |
| Figura 22 – Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). ....  | 81 |
| Figura 23 – Execução do ensaio de penetração de íons cloretos.....   | 83 |
| Figura 24 – Esquema da divisão do corpo de prova para teste de difusão de cloretos.....  | 85 |
| Figura 25 – Execução do ensaio de retração livre. ....   | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 26 – Detalhamento do anel de retração restringida.....  | 87  |
| Figura 27 – Execução do ensaio de retração restringida.....  | 87  |
| Figura 28 – Execução do ensaio de abrasão.....   | 89  |
| Figura 29 – Valores médios de ganho de massa em função do tempo – ensaio de absorvidade.....   | 91  |
| Figura 30 – Valores médios de absorção de água e índice de vazios.....   | 94  |
| Figura 31 – Valores médios de absorção de água por capilaridade.....   | 96  |
| Figura 32 – Alturas totais médias de penetração de água: CE (a), CP (b), ECC-REF (c), ECC-CCA-28dias (d) e ECC-CCA-91dias (e). ....    | 98  |
| Figura 33 – Alturas médias de coluna de água – ensaio do cachimbo. ....  | 99  |
| Figura 34 – Comparação microscópica de um poro capilar presente nos compósitos: ECC-REF (a) e ECC-CCA (b).....                         | 101 |
| Figura 35 – Correntes médias (A) obtidas no ensaio de penetração de íons cloretos. ....  | 102 |
| Figura 36 – Cargas médias (Coulombs) obtidas no ensaio de penetração de cloretos.....  | 103 |
| Figura 37 – Determinação das profundidades de penetração de cloretos, em centímetros, pelo método de aspersão de nitrato de prata..... | 107 |
| Figura 38 – Valores médios de deformação por retração livre em função do tempo.....  | 109 |
| Figura 39 – Gráfico da deformação do anel <i>versus</i> tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Concreto Estrutural (CE).....                 | 111 |
| Figura 40 – Gráfico da deformação do anel <i>versus</i> tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Concreto Pavimento (CP). ....                 | 111 |
| Figura 41 – Gráfico da deformação do anel <i>versus</i> tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Compósito de referência (ECC-REF). ....       | 112 |
| Figura 42 – Gráfico da deformação do anel <i>versus</i> tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Compósito com cinza (ECC-CCA).....            | 112 |
| Figura 43 – Mapeamento das fissuras de retração restringida do Concreto Estrutural (CE): Anel 1 (a) e Anel 2 (b).....                  | 115 |
| Figura 44 – Mapeamento das fissuras de retração restringida do Concreto Pavimento (CP): Anel 1 (a) e Anel 2 (b).....                   | 116 |
| Figura 45 – Mapeamento das fissuras de retração restringida do Compósito de referência (ECC-REF): Anel 1 (a) e Anel 2 (b).....         | 117 |
| Figura 46 – Mapeamento das fissuras de retração restringida do Compósito com cinza (ECC-CCA): Anel 1 (a) e Anel 2 (b). ....            | 118 |
| Figura 47 – Aspecto geral de um dos corpos de prova no ensaio de retração restringida.....   | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 48 – Valores de perda de massa por abrasão. ....                              | 122 |
| Figura 49 – Aspecto geral dos corpos de prova no ensaio de abrasão Los Angeles. .... | 123 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Gastos em países desenvolvidos com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado (UEDA & TAKEWAKA, 2007). .....          | 30 |
| Tabela 2 – Valor de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes (BENTUR E MINDESS, 2007). ..... | 32 |
| Tabela 3 – Comparação entre os métodos para determinação da <i>absortividade</i> (adaptado de GRAEFF, 2011). .....                         | 49 |
| Tabela 4 – Comparação entre os métodos de penetração de cloretos no concreto.....  | 56 |
| Tabela 5 – Teor limite de cloreto para diversas normas (FIGUEIREDO, 2011). .....   | 58 |
| Tabela 6 – Aplicação dos testes de abrasão (BAKKE, 2014). .....  | 65 |
| Tabela 7 – Resumo das variáveis utilizadas na pesquisa.....  | 67 |
| Tabela 8 – Nomenclatura utilizada na designação dos traços. ....   | 68 |
| Tabela 9 – Proporções das misturas. ....   | 69 |
| Tabela 10 – Ensaio químicos, físicos e mecânicos do cimento CP V-ARI MAX.....  | 70 |
| Tabela 11 – Características químicas e físicas da cinza de casca de arroz (CCA).....   | 71 |
| Tabela 12 – Composição granulométrica da areia fina. ....  | 72 |
| Tabela 13 – Composição granulométrica da areia média.....  | 73 |
| Tabela 14 – Composição granulométrica da brita. ....   | 74 |
| Tabela 15 – Características da fibra de polipropileno. ....  | 75 |
| Tabela 16 – Classificação quanto ao risco de penetração de íons cloretos. ....   | 84 |
| Tabela 17 – Classificação do potencial de fissuração – Ensaio de retração restringida.....   | 88 |
| Tabela 18 – Resultados da taxa de absorção média ( $\text{g/cm}^2\text{h}^{1/2}$ ) e resistência capilar média ( $\text{h/m}^2$ ). .....   | 92 |
| Tabela 19 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à taxa de absorção.....                       | 92 |
| Tabela 20 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à resistência capilar.....                    | 93 |
| Tabela 21 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à absorção. ....                              | 95 |
| Tabela 22 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto ao índice de vazios.....                      | 95 |
| Tabela 23 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à absorção de água por capilaridade. ....     | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 24 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à absorção de água por capilaridade. ....                     | 100 |
| Tabela 25 – Cargas Q médias e avaliação qualitativa da penetrabilidade de íons cloreto. ....   | 103 |
| Tabela 26 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à carga elétrica (ensaio de penetração de íons cloreto). .... | 105 |
| Tabela 27 – Intervalos de profundidade utilizados (em milímetros) – Ensaio de difusão de cloretos. ....  | 106 |
| Tabela 28 – Variáveis (concentrações, profundidade e tempo) e coeficiente de difusão ( $D_{app}$ ). ....   | 108 |
| Tabela 29 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Concreto Estrutural (CE). ....                            | 119 |
| Tabela 30 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Concreto Pavimento (CP). ....                             | 119 |
| Tabela 31 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Compósito Referência (ECC-REF). ....                      | 119 |
| Tabela 32 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Compósito com Cinza de Casca de Arroz (ECC-CCA). ....     | 119 |
| Tabela 33 – Taxa de tensão média entre extensômetros e anéis, e classificação do potencial de fissuração de cada concreto/compósito. ....                  | 120 |

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a fundamentação que deu subsídio à proposta da pesquisa deste trabalho. Primeiramente é abordada uma contextualização do tema seguida da justificativa do estudo. Na sequência, são apresentados os objetivos, delineamento e estratégia de pesquisa e a organização do trabalho.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O avanço considerável no segmento da construção civil, compreendido entre o final do século XIX e os dias atuais, foi distinto, principalmente, pela introdução e consolidação do cimento Portland como aglomerante básico na fabricação de concretos e argamassas, permitindo a moldagem de estruturas diversas. A indústria, concomitantemente, ampliou e aprimorou, ao longo dos anos, a diversidade de produtos relacionados ao cimento, aço e o desenvolvimento de aditivos para concreto e argamassas.

Apesar do avanço tecnológico crescente na construção civil, a falta de durabilidade das estruturas de concreto, tanto em edificações como pavimentação, tem sido constatada com acentuada assiduidade e proporção. Em geral, os danos manifestantes em estruturas de concreto são oriundos do comportamento estrutural (interação entre elementos), da reatividade entre componentes do concreto e ação de agentes agressivos. Além disso, os erros de projeto e execução aliados a condições de exposição desfavoráveis contribuem para o desenvolvimento de sérios problemas de deterioração do concreto. No caso de rodovias, segundo Garcez (2009), o excesso dos limites de tráfego solicitantes normalizados e previstos em projetos, bem com a exposição dos elementos, de forma contínua, faz com que o processo de degradação das estruturas rodoviárias seja intensificado.

Segundo Isaia (2011), uma das principais causas de deterioração prematura das estruturas, pelo menos até 1980, foi a consideração, por parte de projetistas e executores, apenas da resistência mecânica como principal parâmetro de projeto, minimizando questões relacionadas à durabilidade e técnicas de execução. O autor enfatiza, ainda, que a durabilidade e resistência mecânica são as duas propriedades mais relevantes de uma construção em

concreto, devendo ser analisadas em conjunto com as condições ambientais, uma vez que interagem entre si.

O crescimento da preocupação com a durabilidade e vida útil das estruturas alavancou-se nas últimas duas décadas em função dos crescentes problemas de degradação precoce, das novas necessidades competitivas e das exigências de sustentabilidade. Esta nova visão está, gradativamente, sendo incorporada às técnicas de projeto e dimensionamento, visando garantir a integridade das estruturas por mais tempo. Todavia, o problema de deterioração prematuro das estruturas é, ainda, ressaltado nos dias atuais, no qual diversas estruturas de idades não avançadas apresentam um quadro patológico precoce, manifestado em formas de fissuras, trincas, deslocamentos e, no caso estruturas de concreto armado, na corrosão das armaduras.

Diante disso, evidencia-se a necessidade de entender os mecanismos que levam à deterioração das estruturas de concreto, e evoluir incessantemente para o desenvolvimento da concepção de novos materiais e técnicas construtivas, de modo a aumentar a vida útil das estruturas e contribuir para evitar o processo de degradação.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A durabilidade das estruturas de concreto está diretamente relacionada com a estrutura de poros, microfissuras da pasta de cimento e com a forma de ingresso e transporte de agentes agressivos, tanto no estado líquido como gasoso (SILVA, 2011). Segundo Hilsdorf (1995), o critério mais confiável na caracterização do concreto quanto à durabilidade é a resistência à penetração de agentes agressivos.

Um dos fatores fundamentais, que tem como consequência a alteração das outras propriedades do concreto, é o mecanismo de fissuração, uma vez que, quando ocasionado, altera a estrutura de poros e contribui para o transporte de substâncias. Segundo ACI (2001), essas fissuras podem resultar da retração restringida, deformações térmicas, reações químicas, práticas indevidas de construção e cargas mecânicas, já que o concreto também é submetido a tensões de tração devido aos esforços atuantes. Cabe ressaltar que a resistência à tração do concreto é cerca de apenas 10% da sua resistência à compressão, fato que acarreta em fissuração quando submetido a tais esforços. Mindness *et al.* (1981) afirmam que a formação de fissuras aumenta as propriedades de transporte, de modo que a água, oxigênio e íons cloretos podem

penetrar facilmente no concreto. As dimensões dessas fissuras podem variar de microfissuras internas que ocorrem na aplicação de uma pequena quantidade de deformação, para rachaduras causadas por interações indesejáveis com o meio ambiente.

Nos últimos anos, os esforços para modificar o comportamento frágil do concreto convencional, bem como os problemas relacionados à falta de durabilidade gerada, principalmente, pela propagação de fissuras, resultaram em conceitos modernos de compósitos cimentícios de ultra desempenho reforçado com fibras, conhecidos por *Engineered Cementitious Composites (ECC)* ou *High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites (HDFRCC)*. Este compósito foi difundido a partir da concepção de concretos de alto desempenho com fibras, consolidado no final do século XX. Segundo Li (1998), pesquisador que deu origem ao compósito, o *ECC* é micromecanicamente adaptado para alcançar elevada ductilidade e resistência à tração, cujo principal comportamento é a capacidade de múltipla fissuração de pequenas aberturas e o endurecimento sob deformação (*strain-hardening*).

De maneira geral, o *ECC* apresenta curva tensão-deformação, quando submetido à tração, semelhante aos materiais metálicos, podendo atingir níveis de deformação da ordem de 5%, ao contrário dos concretos convencionais que falham quando a deformação específica atinge patamares da ordem de 0,01% (GARCEZ, 2009). O desenvolvimento da abertura de fissuras durante a deformação do *ECC*, mesmo na carga máxima, permanece na ordem de 50 a 80  $\mu\text{m}$ , enquanto que, um concreto armado convencional, pode chegar a aberturas de fissuras da ordem de 400  $\mu\text{m}$ .

Visando contribuir para mitigar os problemas patológicos em estruturas de concreto (edificações e rodoviárias) no Brasil e para o desenvolvimento e aplicação de novos materiais na construção civil, o Laboratório de Ensaio de Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) consolidou, nos últimos cinco anos, um grupo de pesquisa voltado ao estudo do *ECC* aliado à utilização de materiais nacionais. A concepção tem sido baseada na aplicação de materiais que proporcionem custos mais baixos e fomentem questões de sustentabilidade ambiental. O grupo obteve resultados promissores, através do trabalho de Garcez (2009) com a utilização de fibras de polipropileno de alto desempenho no lugar das fibras de PVA inicialmente utilizadas na consolidação do compósito. As fibras de polipropileno são produzidas e comercializadas no país e acarretam em um custo mais baixo

na produção do compósito, uma vez que seriam necessárias importações para o uso das fibras de PVA.

Atualmente, um estudo de caracterização do material, realizado por Righi<sup>1</sup> (2015) tem mostrado a eficácia da utilização de materiais cimentícios suplementares, como a cinza de casca de arroz (CCA) sem controle de queima em substituição parcial do cimento. O trabalho foca na obtenção de misturas viáveis, econômicas e mais sustentáveis, já que o compósito consome grande quantidade de cimento (cerca de 1.000 kg/m<sup>3</sup>) em comparação a concretos convencionais. Sabe-se que o uso de pozolanas diminui a liberação de calor durante a hidratação da pasta, fato que pode auxiliar na diminuição das microfissurações do material nas primeiras idades.

Diante disso, o presente trabalho visa contribuir para o avanço do estudo na área, avaliando a estrutura de poros do material e processos que podem afetar o seu desempenho quando aplicado na execução ou reparo de estruturas (edificações e rodoviárias), verificando suas reações frente às situações usualmente encontradas na prática, ao longo de sua vida útil.

### 1.3 OBJETIVOS

Neste item são apresentados os objetivos do trabalho, subdivididos em objetivo geral, destacando o foco principal da pesquisa, e objetivos específicos, mostrando cada ponto que se deseja enfatizar com o estudo.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Coletar dados sobre as características de durabilidade dos *Engineered Cementitious Composites – ECC*, com utilização de fibras de polipropileno e cinza da casca de arroz, tendo como foco os processos de deterioração mais significativos que podem potencialmente afetar o desempenho dos mesmos quando aplicados em pavimentos ou estruturas de concreto.

---

<sup>1</sup> RIGHI, D. P. Caracterização do Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação com Utilização de Fibras de Polipropileno e Cinza de Casca de Arroz. (A ser publicado) Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Diante do objetivo principal do trabalho, foram definidos os objetivos específicos, que delimitam um conjunto de fatores que caracterizam a durabilidade do ECC com e sem cinza de casca de arroz, são eles:

- a) Analisar a estrutura de poros através de ensaios de absorvidade, absorção e índice de vazios, absorção de água por capilaridade, absorção de água pelo método do cachimbo e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- b) Avaliar o transporte de agentes agressivos pela ação de cloretos, por meio de ensaios de penetração acelerada e difusão;
- c) Analisar como os fenômenos de retração livre e restringida afetam o desenvolvimento de fissuração e microfissuração do material;
- d) Verificar a resistência à abrasão através da perda de massa do material;
- e) Verificar a influência do tempo de cura do compósito com cinza de casca de arroz quanto à estrutura de poros e a ação de cloretos.
- f) Comparar os compósitos de ECC com e sem cinza de casca de arroz a concretos convencionais aplicados em estruturas de concreto armado e pavimentos rígidos, que serão utilizados como um patamar de referência de durabilidade.

## 1.4 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Como mencionado anteriormente, os aspectos de durabilidade das estruturas estão diretamente relacionados com o transporte de substâncias agressivas, com a estrutura e dimensões dos poros, abertura de fissuras, grau de saturação do sistema poroso e condições ambientais. A criação do compósito *ECC* visa solucionar os problemas de desempenho mecânico dos concretos convencionais. Entretanto, para que o mesmo possa ser aplicado em estruturas diversas, seja em edificações ou rodoviárias, é necessário que apresente durabilidade igual ou superior aos concretos usuais. Desta forma, o presente trabalho busca, em síntese, fornecer respostas para as seguintes perguntas:

- Como a substituição e não substituição do cimento por cinza de casca de arroz e adição de fibras de polipropileno ao *ECC* afeta a quantidade, dimensão e distribuição dos poros da matriz, e como estes contribuem para a penetração de substâncias dissolvidas?
- Qual o risco relacionado à penetração e difusão de cloretos nos compósitos, quando aplicados em elementos armados localizados em zonas marinhas, como em edificações, rodovias e estruturas de pontes?
- A fissuração, gerada tanto por cargas mecânicas como por retração, é considerada um caminho que facilita o ingresso de agentes agressivos. Sendo assim, qual o nível de retração e abertura de fissuras nos compósitos? A adição de cinza da casca de arroz ao *ECC* diminui efetivamente a retração do material e, por consequência, a fissuração?
- Qual a resistência à abrasão dos compósitos quando aplicados em pontes e rodovias, cuja superfície encontra-se em constante desgaste superficial, seja pelo impacto da água e detritos, seja pela passagem de automóveis?
- Quais os principais benefícios ou desvantagens, em termos de durabilidade, quando se aplica o *ECC* (com fibras de polipropileno e com e sem a utilização de cinza de casca de arroz) em relação a concretos convencionais utilizados em edificações e estruturas rodoviárias?

## 1.5 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

O presente trabalho propõe analisar aspectos de durabilidade do *ECC* com fibra de polipropileno, com e sem a incorporação de cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento, e compará-los a concretos convencionais. O fluxograma da Figura 1 resume as etapas constituintes da pesquisa, de forma a propiciar o entendimento global do trabalho.

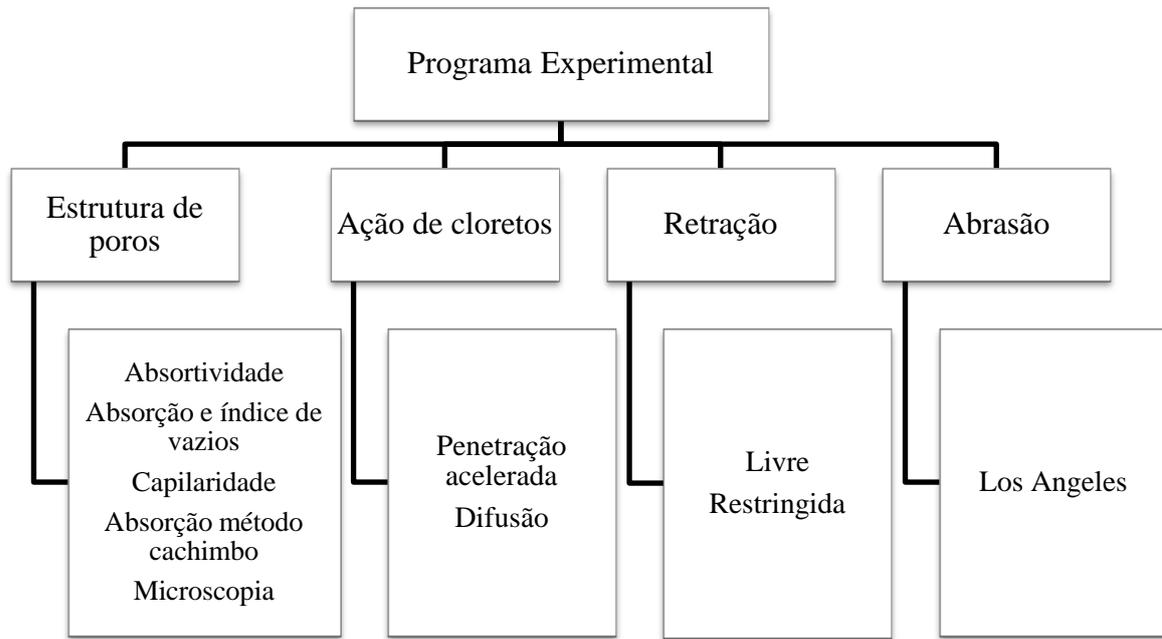


Figura 1 - Fluxograma das etapas do trabalho.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação foi organizada em seis capítulos. O Capítulo 1 expôs o tema, abordando a contextualização e justificativa para realização do trabalho. Na sequência, foram apresentados os objetivos, delineamento da pesquisa e, por fim, a estrutura do programa experimental.

O Capítulo 2 aborda aspectos gerais sobre durabilidade das estruturas, concretos e compósitos especiais, apontando um breve histórico sobre o quadro patológico desenvolvido nas estruturas de concreto, seja em edificações, seja em estruturas rodoviárias de pavimentos rígidos. O capítulo também versa sobre o surgimento da concepção de concretos e compósitos especiais e como estes se desenvolveram na criação de compósitos cimentícios de alto desempenho.

No Capítulo 3 são descritos os principais aspectos responsáveis pela análise da durabilidade de concretos e compósitos cimentícios, isto é, a estrutura de poros e os mecanismos de transporte e degradação, com ênfase na ação de cloretos, retração e desgaste abrasivo. Os conceitos expostos neste capítulo servem de auxílio no entendimento e explicação dos fenômenos estudados.

O Capítulo 4 apresenta o programa experimental estabelecido, incluindo a descrição dos materiais utilizados para moldagem dos corpos de prova. O capítulo descreve, em detalhes, os ensaios, métodos e normas adotados para análise da durabilidade dos compósitos e concretos confeccionados.

Na sequência, o Capítulo 5 apresenta os resultados e análises feitas com base no embasamento teórico descrito no Capítulo 3 e 4. A partir dos resultados, pretende se obter subsídios para responder às perguntas listadas no item 1.4 deste capítulo.

Por fim, as considerações finais e conclusões da pesquisa são apresentadas no Capítulo 6. O capítulo discute, ainda, sugestões para trabalhos futuros, visando à continuação e complementação do estudo.

## 2 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE, CONCRETOS E COMPÓSITOS ESPECIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os principais conceitos relativos ao tema de pesquisa. Inicialmente, são abordados concepções sobre durabilidade e degradação de estruturas de concreto. Na sequência, são descritos, de forma sucinta, o surgimento e desenvolvimento de concretos e compósitos especiais. Por fim, o capítulo enfatiza o comportamento e propriedades de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras (*Engineered Cementitious Composites – ECC*).

### 2.1 DURABILIDADE E DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

No início da década de 80, o conceito de durabilidade tomou ênfase a partir das questões de desempenho, como constituinte das necessidades do usuário, formuladas pela ASTM E 632:1982 (*Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials*), pela ISO 6241:1984 (*Performance standards in building – Principles for their preparation and factors to be considered*) e, mais tarde, no Brasil, pela NBR 6118 em 2003 (Projeto de estruturas de concreto — Procedimento) e NBR 15575 em 2010 (Edificações habitacionais — Desempenho), atualizadas em 2014 e 2013, respectivamente.

O CEB (1992) criou uma relação entre durabilidade das estruturas de concreto armado e desempenho, através de um fluxograma, representado na Figura 2. Nota-se que a perda de durabilidade está diretamente relacionada ao desempenho, uma vez que as propriedades que garantem o desempenho podem ser comprometidas pelos processos de deterioração. Segundo Souza e Ripper (1998), da observação da Figura 2, compreende-se que a combinação dos fatores ambientais (umidade, temperatura, vento, chuva, salinidade e agressividade química ou biológica) transportados para a massa de concreto, bem como a resposta dessa massa a tal ação, constituem os principais elementos de caracterização da durabilidade, ressaltando a água (ou a umidade) como o principal elemento de todo processo.

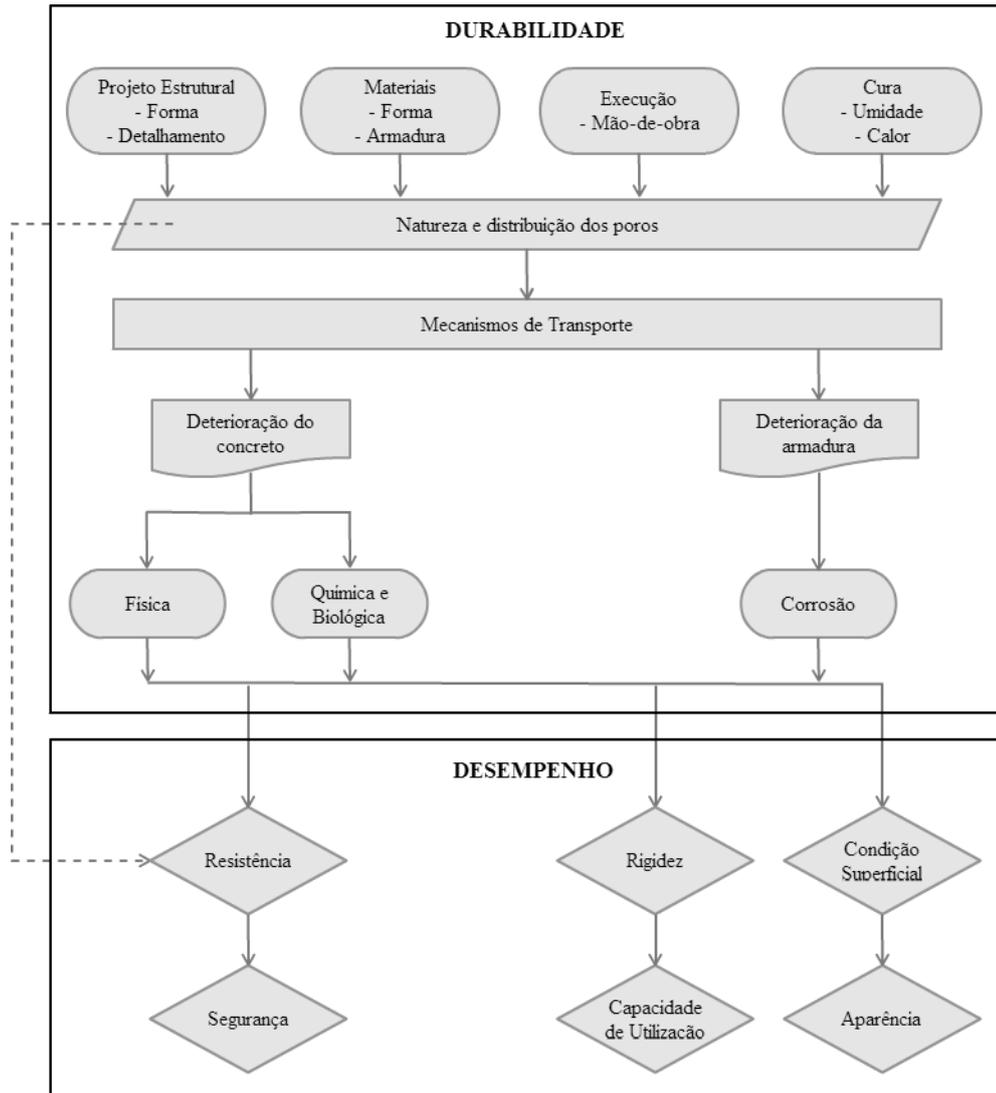


Figura 2 – Relação entre durabilidade e desempenho (CEB, 1992).

Nos últimos 20 anos, inúmeros artigos de especialistas e documentos internacionais têm contribuído para introduzir e consolidar novos conceitos de desempenho, durabilidade e aumento do tempo de vida útil das estruturas de concreto. Cabe ressaltar que os termos durabilidade e vida útil são tratados analogamente. Em suma, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), o conceito de *durabilidade* “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. Já o conceito de *vida útil* consiste no “período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais”.

A concepção destes conceitos tem sido aplicada, ao longo dos anos, às questões de projeto e execução de estruturas de concreto. Todavia, apesar de todo esse desenvolvimento, ainda verifica-se a degradação precoce de estruturas que, em geral, constituem indícios de comportamento irregular de componentes do sistema, caracterizados por manifestações patológicas.

É fato que as ocorrências das manifestações patológicas nas estruturas de concreto provêm de erros de projeto, materiais, execução ou uso, podendo, até mesmo, proceder de um conjunto desses fatores. Muitos pesquisadores afirmam que a maior causa de manifestações patológicas nas estruturas é resultante de falhas de projeto e/ou execução, o que pode ser atribuído à negligência de ações, à desconsideração de agentes agressivos ou mesmo ao pequeno conhecimento de processos degenerativos.

Carmona e Marega (1988) realizaram um levantamento das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no Brasil, através de inúmeros relatórios técnicos de casos ocorridos em diferentes regiões do país (Figura 3). No estudo, verifica-se que 52% dos problemas provêm da execução, embora muitos autores, atualmente, julgam o projeto como o princípio da ocorrência dos problemas construtivos. A Figura 3 (b) mostra, ainda, que dentro das principais ocorrências patológicas em elementos de concreto, a fissuração representa 52% das incidências. Cabe ressaltar que não há dados mais atuais que representem de forma geral as manifestações patológicas no Brasil.

Segundo Dal Molin (1988), a fissuração na superfície de uma estrutura de concreto armado é inerente ao próprio material, tendendo a agravar-se pelo crescente aproveitamento das resistências dos materiais e, em particular, do aço, que trabalha em elevadas tensões de serviço. A autora frisa que, mesmo com ações preventivas, nem sempre é possível impedir completamente o aparecimento de fissuras nas estruturas de concreto. Sabe-se que as fissuras são provenientes de inúmeros fatores como: carregamentos, variações térmicas, incompatibilidade entre os materiais, retração, reações químicas, etc.

No caso de pavimentos rígidos, o problema da fissuração se mantém como um dos principais agravantes na deterioração do concreto. A fissuração, além de permitir a entrada de agentes agressivos, pode propagar-se com a ação de carregamentos cíclicos e desgastes abrasivos, contribuindo ainda mais para a redução da vida útil do material.

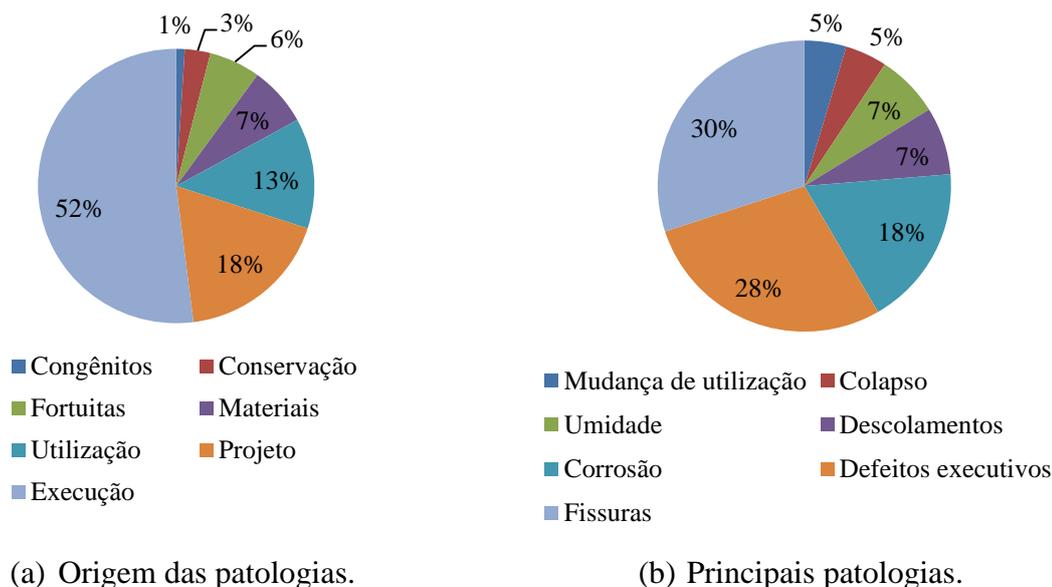


Figura 3 – Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no Brasil: origem e incidências (CARMONA E MAREGA, 1988).

Como forma de estender a vida útil de estruturas de concreto, inúmeros gastos com manutenção e reparo são realizados todos os anos no país, representando valores de mais ou menos 50% da construção total. A Tabela 1 evidencia os gastos exorbitantes realizados em alguns países no ano de 2004 em reabilitação de estruturas de concreto armado. No caso de pavimentos, nos Estados Unidos, o relatório *Report Card of America's Infrastructure* (ASCE, 2013), chama a atenção para o estado de degradação de grande parcela das suas rodovias, sugerindo a necessidade de investimentos anuais de U\$ 170 bilhões. Atualmente, uma parcela de U\$ 91 bilhões já é investida, todavia é insuficiente para elevar a classificação do sistema rodoviário do país.

Tabela 1 – Gastos em países desenvolvidos com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado (UEDA & TAKEWAKA, 2007).

| País        | Gastos com construções novas   | Gastos com manutenção e reparo | Gastos totais com construção     |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| França      | 85,6 Bilhões de Euros<br>(52%) | 79,6 Bilhões de Euros<br>(48%) | 165,2 Bilhões de Euros<br>(100%) |
| Alemanha    | 99,7 Bilhões de Euros<br>(50%) | 99,0 Bilhões de Euros<br>(50%) | 198,7 Bilhões de Euros<br>(100%) |
| Itália      | 58,6 Bilhões de Euros<br>(43%) | 76,8 Bilhões de Euros<br>(57%) | 135,4 Bilhões de Euros<br>(100%) |
| Reino Unido | 60,7 Bilhões de Euros<br>(50%) | 61,2 Bilhões de Euros<br>(50%) | 121,9 Bilhões de Euros<br>(100%) |

Nota: todos os dados se referem ao ano de 2004, exceto no caso da Itália que se refere ao ano de 2002.

Em suma, podemos admitir que a raiz dos problemas de custos com manutenção é a inerente fragilidade do concreto, já que a fissuração sob cargas permite que a água e agentes agressivos penetrem facilmente no interior do material, acelerando a sua degradação. Segundo Lepech e Li (2006), muitas melhoras foram feitas em relação à durabilidade do concreto ou recomendações mínimas de reforço, mas poucas soluções têm como alvo o déficit intrínseco do material. O autor adverte, ainda, que para resolver os graves desafios confrontados pela infraestrutura global, é necessária uma solução fundamental para reduzir a sua natureza frágil.

## 2.2 DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS E COMPÓSITOS ESPECIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS

A incorporação das fibras em concretos e compósitos difundiu-se no intuito de minimizar as limitações, oriundas de seu comportamento frágil e da baixa capacidade de deformação apresentada antes da ruptura quando tracionado. A resistência à tração do concreto, por ser significativamente inferior (cerca de 7-10%) a sua resistência à compressão, acarreta na propagação de fissuras e microfissuras geradas transversalmente à direção da tensão de tração. Segundo Magalhães (2010), as fibras adicionadas à matriz diminuem o tamanho das aberturas de fissuras, pois aumentam a capacidade de absorção de energia e resistência ao impacto.

### 2.2.1 Características gerais das fibras e interação fibra-matriz

Os estudos com a utilização de fibras em matrizes cimentícias evoluíram significativamente ao longo dos anos, resultando em uma gama de fibras disponíveis no mercado e testadas por inúmeros pesquisadores. Cada tipo de fibra interfere distintamente na capacidade de reforço do compósito, já que dependem de fatores como módulo de elasticidade, resistência mecânica, aderência, geometria e o teor utilizado.

Segundo Bentur e Mindess (2007), desde a utilização inicial de fibras de amianto, outras fibras têm sido usadas juntamente com cimentos hidráulicos: fibras convencionais, tais como as de aço e vidro; novas fibras, tais como carbono ou kevlar; e fibras de baixo módulo, feita pelo homem (polipropileno, nylon) ou naturais (celulose, sisal). Estes tipos de fibras variam consideravelmente, tanto em propriedades, quanto em eficácia e custo. Na Tabela 2 são apresentadas diferentes propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras comuns utilizadas no reforço de matrizes cimentícias.

Tabela 2 – Valor de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes (BENTUR E MINDESS, 2007).

| <i>Material</i>       | <i>Diâmetro<br/>(<math>\mu\text{m}</math>)</i> | <i>Densidade<br/>(<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i> | <i>Módulo de<br/>Elasticidade<br/>(GPa)</i> | <i>Resistência à<br/>tração (GPa)</i> | <i>Deformação na<br/>ruptura (%)</i> |
|-----------------------|--|--|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Aço                   | 5-500  | 7,84   | 200   | 0,5-2,0                               | 0,5-3,5                              |
| Vidro                 | 9-15   | 2,60   | 70-80                                       | 2,0-4,0                               | 2,0-3,5                              |
| Amianto (Crocidolite) | 0,02-0,4                                       | 3,4  | 196   | 3,5                                   | 2,0-3,0                              |
| Amianto (Crisolite)   | 0,02-0,4                                       | 2,6  | 164   | 3,1                                   | 2,0-3,0                              |
| Polipropileno         | 20-400   | 0,9-0,95   | 3,5-10,0                                    | 0,45-0,76                             | 15-25                                |
| Kevlar                | 10-12  | 1,44   | 63-120                                      | 2,3-3,5                               | 2,0-4,5                              |
| Carbono               | 8-9  | 1,6-1,7  | 230-380                                     | 2,5-4,0                               | 0,5-1,5                              |
| Náilon                | 23-400   | 1,14   | 4,1-5,2                                     | 0,75-1,0                              | 16-20                                |
| Celulose              | -  | 1,2  | 10,0  | 0,3-0,5                               | -                                    |
| Acrílico              | 18   | 1,18   | 14-19,5                                     | 0,4-1,0                               | 3,0                                  |
| Polietileno           | 25-1000  | 0,92-0,96  | 5   | 0,08-0,60                             | 3-100                                |
| Fibra de madeira      | -  | 1,5  | 71  | 0,9                                   | -                                    |
| Sisal                 | 10-50  | 1,5  | -   | 0,8                                   | 3,0                                  |
| Matriz de cimento     | -  | 1,5-2,5  | 10-45                                       | 0,003-0,007                           | 0,02                                 |

A matriz reforçada com fibras, em seu estado fresco, pode assumir várias formas. Quanto à caracterização da sua natureza, dois níveis de descrição de sua geometria devem ser considerados: (I) as formas individuais das fibras e (II) a sua dispersão em matrizes de cimento. Em relação às formas individuais, as fibras podem ser divididas em dois grupos, isto é, as de monofilamentos e os conjuntos de fibras (fibriladas). As primeiras encontram-se separadas umas das outras, como, por exemplo, as fibras de aço. Já as segundas, são geralmente compostas de feixes de filamentos, cada uma com diâmetro de 10  $\mu\text{m}$  ou menos. Este é o caso típico de muitas fibras sintéticas (como as de polipropileno) ou artificiais, seja inorgânica (por exemplo, as fibras de vidro) ou orgânica (por exemplo, carbono, kevlar, etc.), também aparecendo em algumas fibras naturais (por exemplo, amianto). As fibras agregadas frequentemente matem-se agrupadas no próprio composto e não se dispersam em filamentos individuais (BENTUR E MINDESS, 2007).

No que concerne à orientação das fibras na matriz de cimento, as mesmas podem estar distribuídas em uma (1D), duas (2D) ou três (3D) dimensões, como mostrado na Figura 4. Tal fato depende da forma com que são colocadas e dos procedimentos de vibração, da geometria da amostra e das condições de mistura. Neste sentido, nem sempre as fibras serão distribuídas de forma aleatória e, conseqüentemente, em 3D. De acordo com Bentur e Mindess (2007), quando o comprimento das fibras é consideravelmente alto em comparação a espessura do elemento (por exemplo, painéis de espessura reduzida), as fibras tendem a assumir uma

orientação 2D. Soroushian e Lee (1990) ressaltam que uma orientação 2D também pode ser alcançada devido à vibração excessiva do concreto durante a compactação, o que tende a orientar as fibras em planos horizontais. Em situações em que os limites são próximos (por exemplo, cubos), a configuração é também restrita a distribuição 3D, e as fibras perto dos limites tendem a assumir uma configuração em entre 3D e 1D.

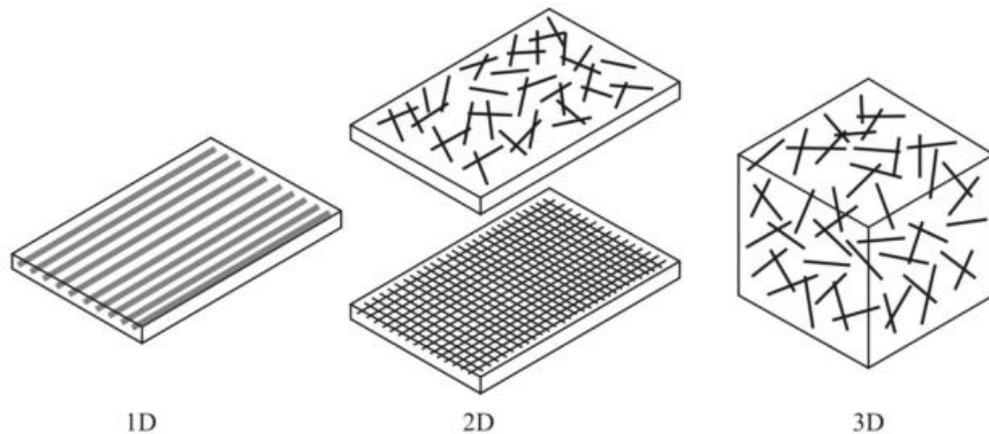


Figura 4 – Arranjos de fibras em uma, duas ou três dimensões (adaptado de BENTUR E MINDESS, 2007).

No estado endurecido, quando as fibras estão devidamente ligadas à matriz, elas interagem de forma a costurar as microfissuras, proporcionando, desta forma, meios de transferência de tensões que retardam sua coalescência e crescimento, conforme mostra a Figura 5, para um diagrama tensão-deformação sob tração de um concreto reforçado com fibras. Se o volume de fibras é suficientemente elevado, isto pode resultar num aumento da resistência a tração da matriz. Uma vez que a capacidade de tração do compósito é alcançada, e a coalescência e conversão das microfissuras em microfissuras ocorreram, as fibras, dependendo de suas características de comprimento e capacidade de ligação, continuam a restringir a abertura de fissuras através de uma ponte eficaz entre as microfissuras. Este pós-pico de ligação entre as microfissuras é o mecanismo de reforço primário na maioria dos concretos reforçados com fibras (BANTHIA, 1994).

No caso de um concreto convencional, ao contrário do reforçado com fibras, Figueiredo (2011) afirma que, quando fissurado, há uma concentração de tensões no topo da fissura que supera a resistência da matriz, ocasionando a ruptura frágil do material. Assim, o autor também ressalta que, quando se adicionam fibras de adequadas propriedades e quantidade à

matriz, o concreto passa a apresentar um comportamento pseudo-dúctil, no qual as fibras passam a transferir as tensões e “costurar” as fissuras, diminuindo sua propagação.

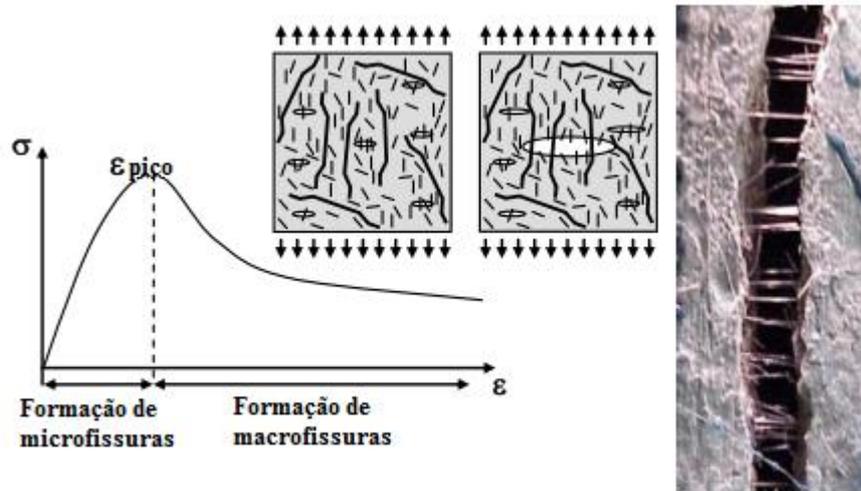


Figura 5 – Reforço da fibra antes e depois da ocorrência de macrofissuras (adaptado de BANTHIA, 1994).

Outro fator importante na consideração da fibra a ser utilizada é o módulo de elasticidade. As fibras que possuem módulo inferior ao concreto endurecido (por exemplo, as fibras poliméricas) são denominadas fibras de baixo módulo. Por sua vez, aquelas que apresentam módulo de elasticidade superior ao concreto endurecido, são denominadas de alto módulo. Em suma, fibras de baixo módulo e baixa resistência, atingem níveis de tensões mais baixos para uma mesma deformação no momento em que uma matriz de cimento atinge sua tensão de ruptura. Isto indica que elevados teores de fibras devem ser incorporados às matrizes para que se possa obter capacidade de reforço. Por outro lado, fibras de elevado módulo de elasticidade e alta resistência apresentam elevado nível de tensão no momento em que o compósito atinge sua deformação crítica, diferentemente das fibras de alto módulo de elasticidade e baixa resistência que rompem antes da matriz (FIGUEIREDO, 2011). Estes comportamentos podem ser verificados na Figura 6. Cabe ressaltar que este gráfico supõe que há uma aderência perfeita entre as fibras e a matriz, assim o compósito irá se deformar com diferentes níveis de tensão para cada uma das fases.

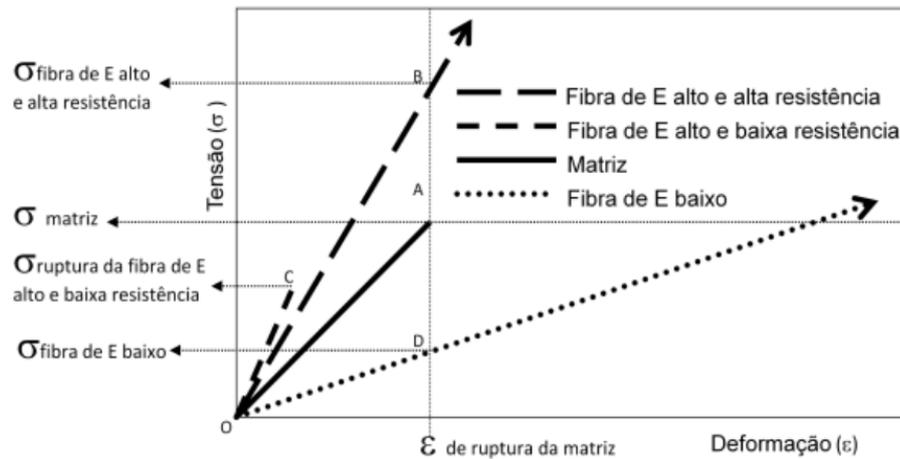


Figura 6 – Diagrama tensão-deformação elástica de matriz cimentícia e fibra de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2011).

De maneira geral, as fibras com maiores capacidade de reforço são aquelas que apresentam maior deformação e maior resistência à tração em relação à matriz de concreto. No entanto, outras propriedades como teor de fibras, aderência e dimensões são de grande relevância no alcance das características mecânicas desejadas.

Figueiredo (2011) aponta que, quanto maior o teor de fibras adicionado à matriz, maior a ponte de transferência de tensões, o que gera o aumento da capacidade de reforço do compósito pós-fissuração. Por outro lado, Pinto Jr. (2001) ressalta que a incorporação de um teor de fibras elevado, dificulta a obtenção de uma matriz homogênea, podendo afetar o desempenho e a trabalhabilidade do material.

No que concerne à aderência, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a diminuição da tenacidade de um concreto reforçado com fibras pode ser causada pela baixa aderência entre a fibra e a matriz, uma vez que as fibras podem escorregar sob carregamentos baixos, não contribuindo para diminuição da fissuração. Em contrapartida, se a aderência à matriz for muito alta, as fibras podem romper-se antes de dissipar energia. Neste caso, as mesmas comportam-se como inclusões inativas, produzindo apenas uma melhoria superficial das propriedades mecânicas.

As dimensões da fibra é, também, outro fator que afeta o desempenho pós-fissuração do compósito. O fator de forma, parâmetro que representa a geometria da fibra, consiste na relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente à área da seção transversal da mesma. Assim, segundo Figueiredo (2011), quanto maior o fator de forma, maior será a capacidade resistente pós-fissuração do compósito, fato que pode ser obtido com o aumento do

comprimento ou redução da seção transversal da fibra. Todavia, segundo o mesmo autor, aumentar indeterminadamente o seu comprimento, não traz benefício no aumento da resistência pós-fissuração. Isto ocorre quando se ultrapassa o seu comprimento crítico da fibra, que está relacionado com a tensão de cisalhamento entre esta e a matriz. Portanto, quando a fibra possuir um comprimento menor que o crítico, a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é suficiente para produzir a ruptura da fibra.

### 2.2.2 A evolução dos compósitos cimentícios reforçados com fibras

Segundo Naaman (2008), a ideia de usar fibras no concreto surgiu no início dos anos 60 com o uso de fibras de aço e, mais tarde, no final da década, com a incorporação de fibras de vidro em matrizes cimentícias de comportamento frágil. Somente a partir dos anos 70 alavancou-se a publicação de trabalhos sobre concretos reforçados com fibras, denominados de FRC (*Fiber Reinforced Concrete*), também conhecido como FRCC (*Fiber Reinforced Cement Composites*).

Os FRCCs foram consolidados com a utilização de fibras curtas (aço, poliméricas e carbono) dispersas em uma matriz de cimento. Sob tensão, os FRCCs tradicionais apresentavam um amolecimento após a primeira fissura, comportamento conhecido como *strain-softening* (LI, 2002). Segundo Naaman (2002), a resistência pós-fissuração na tração dos FRCCs é inferior à resistência de fissuração, caracterizado pela abertura de uma única fissura. Li (1998) ressalta que a primeira fissura ocorrida no material continua a abrir-se enquanto as fibras são puxadas para fora ou rompidas, ocasionando a diminuição da capacidade de transmissão de tensão.

Seguindo esta evolução, foram criados compósitos dúcteis de alto desempenho reforçado com fibras, conhecidos como DFRCC (*Ductile Fiber Reinforced Cement Composites*). Estes compósitos descrevem uma classe particular de FRC, destacados por apresentarem um comportamento de endurecimento com formação de múltiplas fissuras na flexão, conhecido como *deflection-hardening*. Todavia, esse comportamento não era obtido quando o material encontrava-se submetido a esforços de tração direta (NAAMAN, 2002).

A fim de suprir o comportamento insuficiente do material quando tracionado, uma nova classe de compósitos cimentícios foi concebida, denominada de HPFRCC (*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*). Naaman (2002) destaca que nestes compósitos o endurecimento sob deformação é acompanhando de múltipla fissuração. Este comportamento

ficou conhecido como *strain-hardening*, no qual a resistência pós-fissuração na tração uniaxial é maior ou igual à resistência de fissuração. A Figura 7 resume a diferença entre os comportamentos *strain-softening* e *strain-hardening* em tração direta, apresentado pelos FRC (ou FRCC) e HPFRCC, respectivamente.

Na Figura 7 observa-se, portanto, que, após o trecho O-A, o compósito FRC mostra um amolecimento após atingir a tensão de fissuração ( $\sigma_{cc}$ ), representado pela abertura de uma única fissura capaz de diminuir a capacidade de deformação do compósito. Já o compósito HPFRCC exibe um endurecimento pós-fissuração acompanhado de múltiplas fissurações, no qual a resistência pós-fissuração ( $\sigma_{pc}$ ) é maior ou igual à resistência de fissuração ( $\sigma_{cc}$ ), caracterizando o comportamento *strain-hardening*.

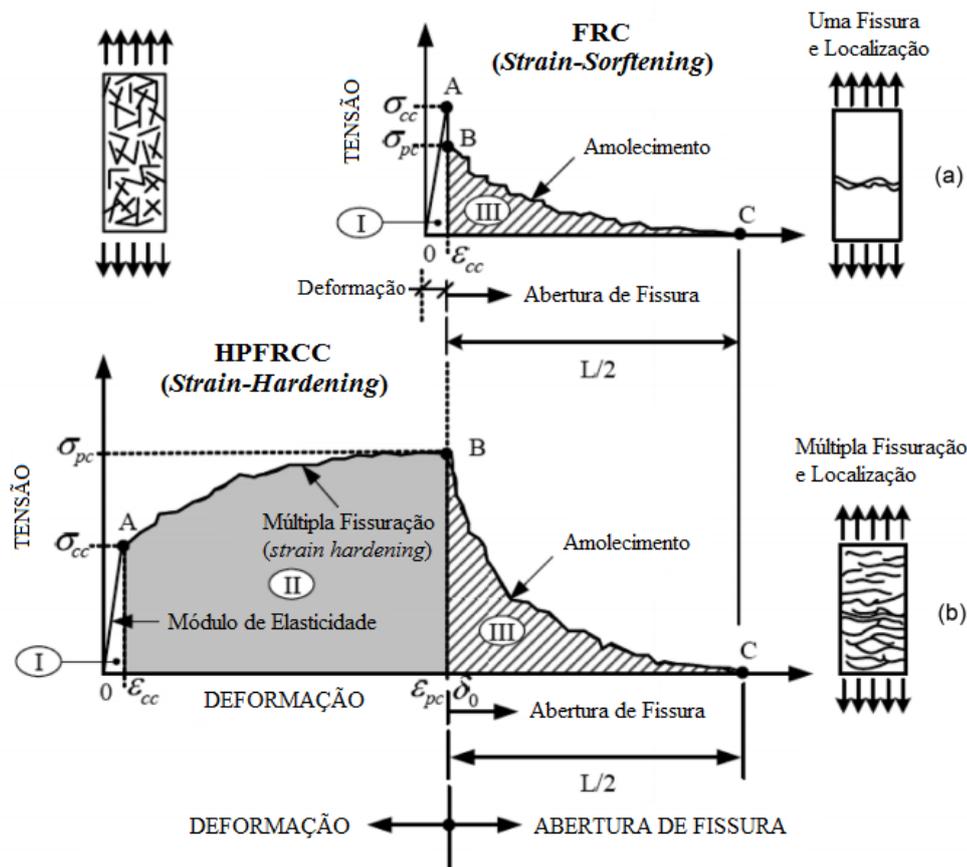


Figura 7 – Comparação da curva tensão x deformação entre FRC (a) e HPFRCC (b) sob tração direta (NAAMAN, REINHARDT, 2006).

A partir da concepção do HPFRCC houve o surgimento de outros compósitos como SIFCON (*Slurry Infiltrated Fiber Concrete*), CRC (*Compact Reinforced Composite*), SIFCA (espécie de SIFCON), SIMCON (*Slurry Infiltrated Mat Concrete*), RPCC (*Reactive Powder Concrete*

*Composites*) e ECC (*Engineered Cementitious Composites*). Estes compósitos, incluídos na categoria do HPFRCC, têm mostrado excelentes combinações de resistência e ductilidade ou capacidade de absorção de energia, ao mesmo tempo em que alcançam um endurecimento sob deformação e múltipla fissuração (NAAMAN, 2003).

### 2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA DEFORMAÇÃO REFORÇADOS COM FIBRAS – *ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)*

Proposto na década de 90 por Victor C. Li (Universidade de Michigan), o ECC (*Engineered Cementitious Composites*) é baseado no princípio de micromecânica e mecânica da fratura, sendo um exemplo típico de HPFRCC. A classificação do ECC pode ser mais bem visualizada na Figura 8, a qual engloba uma disposição geral da concepção dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, quanto a sua ductilidade e resistência.

Os materiais que compõem o ECC são semelhantes a muitos FRCs, isto é, consistem basicamente em uma mistura a base de cimento, areia, água, fibras e uma pequena quantidade de aditivos comerciais. Agregados graúdos não são utilizados devido ao efeito adverso sobre a diminuição do desempenho do compósito. Enquanto a maioria dos HPFRCCs depende de um volume elevado de fibras para atingir um alto desempenho (até 5% em volume), o ECC utiliza quantidades tipicamente baixas de 2% em volume. (LEPECH E LI, 2006).

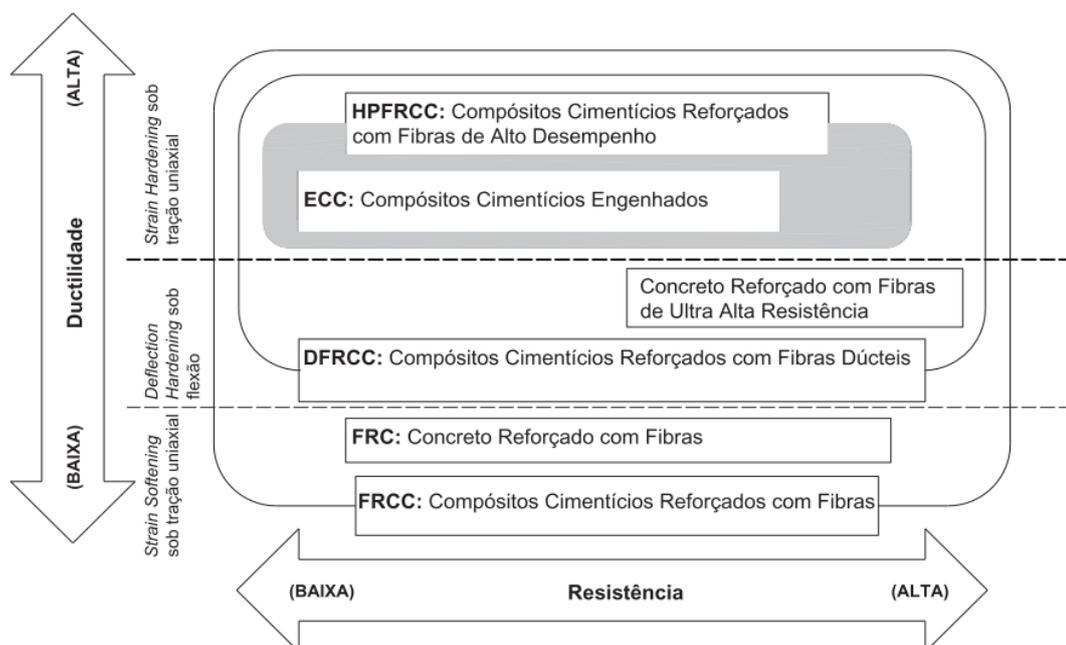


Figura 8 – Classificação dos compósitos cimentícios reforçados com fibras (JSCE, 2008).

Inicialmente, o ECC foi consolidado por Li *et al.* (1998) com o reforço de fibras de polietileno (PE) que apresentavam desempenhos de autoconsolidação no estado fresco e comportamento dúctil (*strain-hardening*) no estado endurecido. Todavia, as fibras de polietileno possuíam elevado custo, o que inviabilizava a aplicação do material. Kanda e Li (1998) e Wu (2000) desenvolveram um ECC com a utilização de fibras de poli(vinil álcool) (PVA), reduzindo o seu custo em, aproximadamente, 87,5%.

Segundo Sahmaran e Li (2010), a principal característica que difere o ECC de um concreto convencional e concretos reforçados com fibras (FRC) é a capacidade de deformação sob tração uniaxial, que varia de 3% a 5%. Esta capacidade de deformação ocorre através da formação de microfissuras, permitindo uma capacidade à tração de 300 a 500 vezes maior do que um concreto convencional. Estas fissuras possibilitam que o material apresente o comportamento de endurecimento sob deformação (*strain hardening*), semelhante a muitos materiais dúcteis.

A Figura 9 apresenta a curva tensão-deformação típica de um ECC comparado a um concreto convencional. Nota-se que, mesmo em carga máxima, a abertura de fissura permanece menor que 60  $\mu\text{m}$ . Segundo Lepech e Li (2006), isto é possível através da formação de “fissuras planas” em estado estacionário, que apresentam largura de fissuração constante, independente do seu comprimento, ao contrário das fissuras presentes em FRCs e HPFRCCs que ampliam com o crescimento das fissuras. No concreto convencional, observa-se que a abertura de uma única fissura gera o rompimento do material.

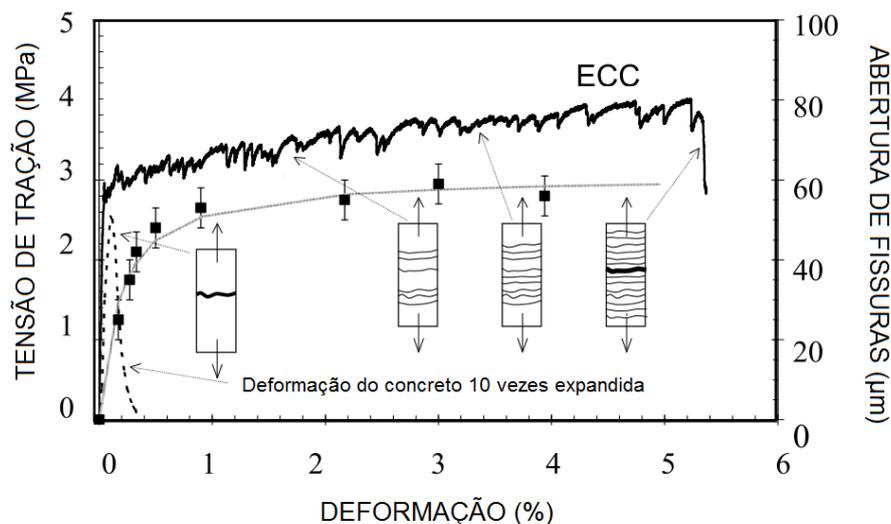


Figura 9 – Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características do ECC e de um concreto convencional (adaptado de SAHMARAN E LI, 2009).

### 2.3.1 A incorporação de materiais cimentícios suplementares

A incorporação de cinzas no ECC teve início com o trabalho de Yang e Li *et al.* (2007) com o uso de altos volumes de cinza volante. Segundo os autores, a adição da cinza no compósito confere grande ductilidade à tração a longos prazos (cerca de 2-3%), além de mostrar uma melhoria robusta na obtenção do comportamento de múltiplas fissurações. Wang e Li (2007) afirmam que a incorporação de cinzas volantes também reduz a abertura de fissuras de 60 µm para 10-30 µm podendo, até mesmo, atingir valores menores que 10 µm, beneficiando a durabilidade e vida útil dos compósitos. A melhoria da deformação na tração e largura de fissuração pode ser atribuída ao fato de que o aumento do teor de cinzas volantes tende a reduzir a tenacidade e ligação química na interface fibra/matriz, enquanto ocorrem acréscimos na ligação de fricção na interface, atingindo alta capacidade de deformação.

Kim *et al.* (2007) estudaram, ainda, a adição de escória de alto forno em compósitos ECC. Os mesmos atingiram deformações de 1,0 a 3,6%, e também apresentaram múltiplas fissurações acompanhados de endurecimento sob deformação (*strain-hardening*).

Recentemente, Zhu *et al.* (2014) avaliaram a composição de compósitos ECC em matrizes binárias e ternárias com a combinação de cimento (*Portland cement – PC*), cinza volante (*fly ash – FL*), escória (*slag – LS*) e sílica ativa (*sílica fume – SF*). A pesquisa contou com substituições em massa de 50%, 60%, 70% e 80% e combinações de: PC+FA, PC+SL, PC+FA+SL e PC+FA+SF. Como conclusões, os autores afirmaram que a combinação de cinzas e escórias pode manter não só a excelente ductilidade do ECC, mas também conferir valores consideráveis de resistência mecânica. Já a combinação de cinzas volantes e sílica ativa pode apenas aumentar a resistência à compressão, mas enfraquecer a tenacidade da matriz.

### 2.3.2 Avanços recentes sobre o estudo do ECC no Grupo de Pesquisa LEME

O Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturas (LEME/UFRGS) consolidou, nos últimos cinco anos, um grupo de pesquisa sobre o *Engineered Cementitious Composites* (ECC), cujo nome foi adaptado para “Compósitos cimentícios de elevada deformação”. O grupo, pioneiro no Brasil, vem aprimorando pesquisas relacionadas à caracterização do compósito, com o emprego de materiais locais, utilizando fibras de polipropileno em conjunto com cinzas volantes ou cinzas da casca de arroz sem controle de queima, visando o desenvolvimento de

mixagens viáveis e mais econômicas, adequando o material a realidade brasileira. Os itens a seguir relatam os trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa.

#### 2.3.2.1 Aplicação do compósito como material para recapeamento de pavimentos

Garcez (2009) desenvolveu uma tese de doutorado na área, sobre a investigação do comportamento do ECC reforçado com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos. A fibra de polipropileno foi testada em substituição da fibra de PVA, inicialmente usada na concepção do compósito por Victor Li. O trabalho também contou com a substituição parcial do cimento por cinza volante. Em suma, os objetivos do trabalho foram verificar o comportamento do compósito à flexão e fadiga, simular camadas de recapeamento de diferentes espessuras, investigar a capacidade do material quanto à fissuração por reflexão e, por fim, uma análise do ciclo de vida, comparando o compósito a concretos e asfaltos, em busca de alternativas de menor custo e interferência ao meio ambiente.

De maneira geral, os compósitos com a utilização de fibras de polipropileno apresentaram um comportamento dúctil através do desenvolvimento de múltiplas fissurações, que atingiram, em média, dimensões de 10  $\mu\text{m}$ , enquanto que, em compósitos com fibras de PVA, a abertura de fissura atinge patamares da ordem de 60  $\mu\text{m}$ . O modelo de previsão de vida útil gerado para recapeamentos mostrou que o ECC requer camadas 1,5 a 2,5 vezes mais finas que as usuais de concreto. Além disso, apesar do alto custo inicial, recapeamentos de ECCs resultam em uma redução do custo total ao longo de um período de 40 anos considerados pela autora.

Outro estudo na área foi realizado por Casagrande (2012), em seu trabalho de conclusão de curso. A pesquisa teve como objetivo avaliar ensaios de flexão, desgaste superficial por abrasão e trabalhabilidade do ECC com a utilização de fibras de polipropileno e substituição parcial do cimento por cinza volante. Para análise da flexão o trabalho contou com a utilização de três métodos, no qual todos acarretaram no aparecimento do processo de múltiplas fissurações. Os ensaios de desgaste superficial, realizado pelo método de Liu, apresentaram resultados satisfatórios, resultando em uma perda de massa de apenas 3,15%.

#### 2.3.2.2 Caracterização mecânica do compósito com a utilização de cinza da casca de arroz e fibras de polipropileno

Atualmente, a dissertação desenvolvida por Righi (2015) objetivou a caracterização mecânica, através de ensaios de tração direta e flexão a quatro pontos, de ECCs com a utilização de fibra

de polipropileno e cinza da casca de arroz sem controle de queima. Além disso, foram realizados ensaios de aderência dos compósitos em concretos convencionais e fissuração por reflexão quando utilizados como material de reforço. O trabalho conta o uso de cinzas de diferentes tempos de moagem (1, 2, 4, 6 e 8 horas) e porcentagens de substituição (10%, 20% e 30%). Como resultado, o compósito com 30% de cinza e tempo de moagem de 8 horas apresentou os melhores resultados no processo de múltipla fissuração e endurecimento sob deformação (*strain hardening*). O melhor desempenho mecânico obtido para este compósito em relação aos demais, deu origem, portanto, a sua escolha para o presente estudo, como comparação ao compósito de referência e aos outros concretos convencionais, na análise da durabilidade.

A Figura 10 mostra a curva tensão-deformação dos compósitos sob tração direta (a) e flexão a quatro pontos (b), no qual o compósito com cinza de casca de arroz (ECC-CCA) mostrou uma capacidade de 1,2% na tração e mais de 6% na flexão. Em contrapartida, o compósito de referência (ECC-REF) apresentou apenas 0,8% e 5,5%, respectivamente.

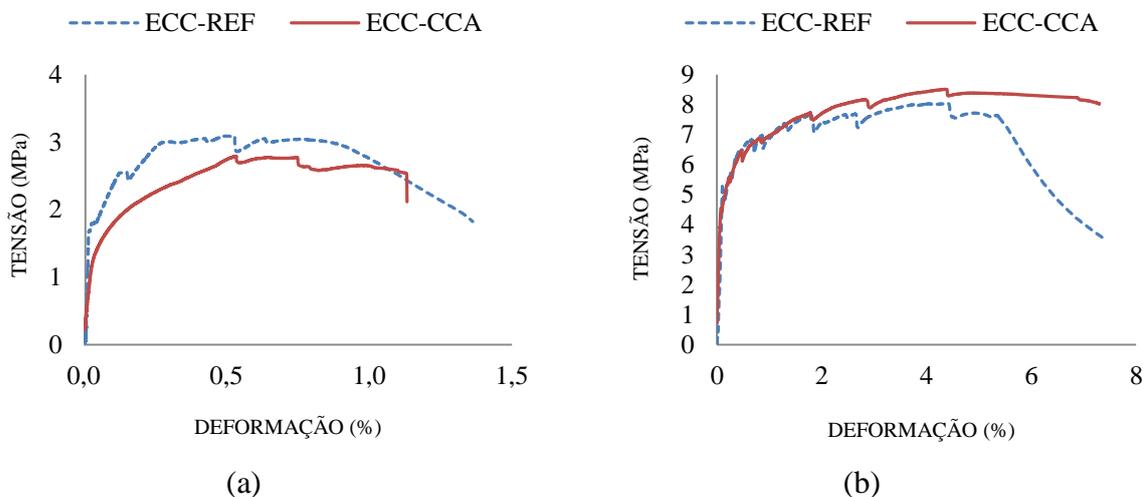


Figura 10 – Curva tensão-deformação dos compósitos sob tração direta (a) e flexão a quatro pontos (b) (RIGHI, 2015).

#### A utilização de cinza de casca de arroz

O uso da cinza de casca de arroz se justifica pela larga escala de produção do arroz, principalmente no estado do Rio Grande do sul, que representa, segundo dados da CONAB (2014), 64% da produção nacional (8,11 milhões de toneladas dos 12,16 milhões produzidos no Brasil). Considerado que a massa do grão equivale a 20% de casca e que, após sua combustão completa, obtêm-se cerca de 20% de cinza, estima-se que 324,4 mil toneladas

desse resíduo foram produzidas somente no estado, na safra de 2012/2013. Desta forma, o uso de cinza de casca de arroz em compósitos visa contribuir na destinação do resíduo, bem como na redução de custos do material e na colaboração da mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção do cimento.

Todavia, um fator importante a ser considerado para que a cinza de casca de arroz possa ser utilizada de forma efetiva na matriz de cimento, é a presença de uma estrutura cristalina ou amorfa na sua composição, fato que está relacionado com a temperatura de queima do material. De acordo com Boating e Skeete (1990), a cinza produzida pela queima controlada entre 550°C e 700°C de incineração durante 1 hora, transforma o teor de sílica da cinza em fase amorfa. Todavia, quando a casca de arroz é convertida em cinza com queima não controlada abaixo de 500°C, a ignição não será completa e um grande teor de carbono não queimado será encontrado na cinza resultante (AL-KHALAF E YOUSIFF, 1984). Segundo Mehta (1992), a reatividade da sílica amorfa é diretamente proporcional à área superficial específica da cinza. Assim, uma diminuição da finura da cinza é realizada para que as mesmas possam ser incorporadas na matriz de cimento. No caso de cinzas residuais pouco reativas, como as utilizadas no presente trabalho, Mehta e Monteiro (2014) também sugerem que as mesmas sejam moídas até a obtenção de um pó fino que possa ter atividade pozolânica, isto é, capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de umidade para formar compostos que exibem propriedades cimentantes.

## 2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentou-se uma visão geral dos principais aspectos referentes ao tema da pesquisa. Como mencionado na Seção 2.1, um dos principais problemas relacionados à patologia das construções provém da fissuração das estruturas de concreto, problema relacionado, principalmente, à inerente fragilidade do material. Diante da necessidade de melhorar as suas propriedades intrínsecas, a Seção 2.2 explora o surgimento de concretos e compósitos especiais reforçados com fibras, evoluindo até a concepção dos compósitos cimentícios de elevada deformação reforçados com fibras (*Engineered Cementitious Composites – ECC*) descritos na Seção 2.3.

### **3 DURABILIDADE: ESTRUTURA DE POROS, MECANISMOS DE TRANSPORTE E DEGRADAÇÃO**

Este capítulo aborda os principais problemas de durabilidade que podem influenciar o desempenho e vida útil dos compósitos cimentícios de elevada deformação (*Engineered Cementitious Composites – ECC*). Dentre eles é discutida a estrutura de poros, em termos de mecanismos de transporte, bem como o efeito da ação de cloretos, retração e desgaste superficial abrasivo.

#### **3.1 ESTRUTURA DE POROS**

Segundo CEB (1992) os parâmetros que caracterizam a estrutura de poros no concreto estão relacionados à porosidade aberta e tamanho dos poros. A porosidade aberta refere-se aos poros interligados, que permitem o transporte de agentes agressivos no material. Já a distribuição e tamanho dos poros influenciam na taxa de transporte.

De acordo com o seu tamanho, os poros do concreto podem ser classificados em macroporos, poros capilares e microporos, conforme a Figura 9. CEB (1992), Neville (2003) e Mehta e Monteiro (2014) afirmam que os poros que afetam o transporte de agentes agressivos no concreto são os poros capilares e macroporos. Silva (2011) ressalta que a conexão entre eles e a tortuosidade são propriedades fundamentais na definição de sua estrutura, no qual somente os poros interconectados participam no transporte das substâncias.

A Figura 11 também mostra a classificação dos poros de acordo com sua origem como gel, capilar e ar (CEB, 1992; NEVILLE, 2003; MEHTA E MONTEIRO, 2014). Conforme Neville (2003) o ar aprisionado é aquele gerado durante a mistura ou retido devido a aditivos. Poros de gel são microporos formados no meio de partículas de gel de cimento, ocupando um volume de 28% nos mesmos, no qual são influenciados pela quantidade de cimento e água de amassamento. Por fim, poros capilares são vazios formados devido à evaporação de água, durante a hidratação e cura.

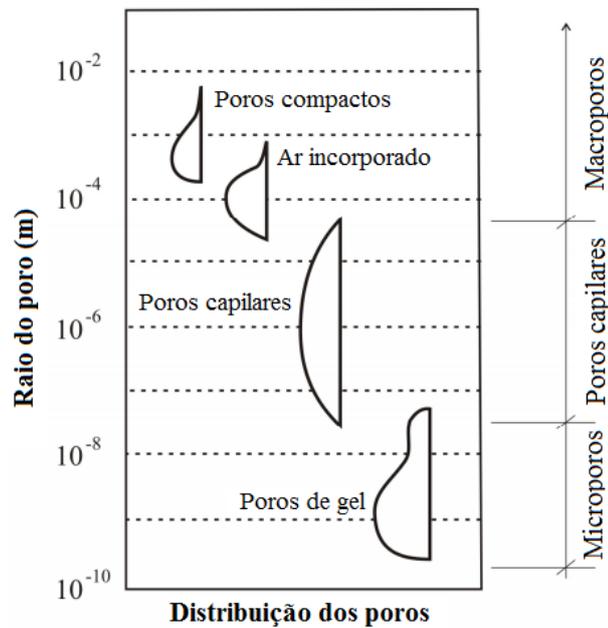


Figura 11 – Classificação dos poros (adaptado de SETZER<sup>2</sup>, 1977, *apud* CEB, 1992).

As propriedades do concreto, tais como resistência, durabilidade, retração e permeabilidade, são diretamente influenciadas e controladas pelo número, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes na pasta de cimento, agregados e componentes da interface matriz-agregado. Paulon e Kirchheim (2011) citam que os principais fatores que podem influenciar neste sistema de distribuição de poros estão relacionados à cura, quantidade e tipos de adições (pozolanas e escórias ativas), relação água/cimento e aditivos químicos.

Segundo Tuutti (1982), quando a relação água/cimento é reduzida, os poros capilares e abertos também reduzem, o que pode gerar uma diferença na permeabilidade de aproximadamente 10 vezes em relação a um alto fator água/cimento. A cura também tem um papel fundamental no transporte de massa do concreto. A permeabilidade é evidentemente menor quando a cura úmida é realizada ao invés de cura ao ar, já que a última pode levar a retração do concreto, contribuindo para o ingresso de agentes agressivos em virtude da microfissuração gerada.

As adições minerais são outro aspecto de suma importância na redução da permeabilidade e absorção do concreto. Conforme Dal Molin (2011), a redução gerada pelas adições pode ser explicada pela reação das mesmas, quando quimicamente ativas, com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, os quais acabam precipitando nos vazios maiores (canais

<sup>2</sup> SETZER, M. J. (1977) "Einfluss des wassergehalts auf die eigenschaften des erhaerteten betons." Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 280, 43-117. In German.

capilares) da pasta de cimento endurecida. A expansão dos produtos de hidratação do cimento Portland com as partículas pozolânicas tem, portanto, um efeito de modificação dos poros, reduzindo a sua interconectividade (COOK *et al.*, 1989). Saraswathy *et al.* (2007) estudaram o efeito da substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz em diferentes níveis de substituição, sobre a absorção de água e porosidade do concreto, e, informaram, que o coeficiente de absorção de água nos concretos em todos os níveis de substituição foi menor do que no concreto convencional. Ganesan *et al.* (2008) também apresentaram resultados satisfatórios de redução da permeabilidade à água, com diminuições de até 35% em concretos contendo 30% de substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz. Os mesmos autores obtiveram ainda, reduções de 28% e 75%, respectivamente, na difusão e permeabilidade a cloretos.

A zona interfacial entre a pasta de cimento e os agregados também faz parte da estrutura de poros do concreto, sendo outro fator determinante na permeabilidade do material. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a zona de transição entre as partículas de agregado graúdo e a pasta, caracterizada por uma camada delgada com espessura de 10 a 50  $\mu\text{m}$ , constitui a área mais fraca do concreto. Esta zona é mais porosa e heterogênea do que o restante da pasta, devido à dificuldade dos produtos de hidratação em envolver a interface do agregado. Além disso, há uma falha na aderência entre a pasta de cimento e o agregado, devido aos grandes cristais formados, de menor superfície específica, o que gera a diminuição da força de adesão (REDA *et al.*, 1999).

Em concretos reforçados com fibras, a zona de transição entre a fibra e a matriz é, também, um local de maior fragilidade. A presença do reforço na pasta de cimento cria um chamado “efeito parede”, isto é, a formação de uma película de água na interface (MINDESS *et al.*, 1986; ZHANG E GJORV, 1990). Esta hipótese também é utilizada para explicar a maior porosidade e a concentração de cristais de portlandita (hidróxido de cálcio) e etringita (trisulfoaluminato de cálcio hidratado), definindo a zona de transição com características muito diferentes do resto da matriz (SAVASTANO, 1992). Savastano e Agopyan (1999), ao estudarem a zona de transição entre fibras de filamento curtas em pastas de cimento Portland, evidenciaram que, no caso de fibras de polipropileno, a zona de transição é quase tão densa como a matriz, apresentando uma espessura não mais que 20  $\mu\text{m}$  e pequena ocorrência de portlandita. Todavia, para todas as fibras estudadas, destaca-se a influência da relação água/cimento, no qual valores mais elevados induzem a um aumento da espessura da zona de transição e/ou maior acumulação de cristais de portlandita.

Devido à baixa quantidade de estudos na área, a influência das fibras na estrutura de poros do concreto ou compósito ainda não está claramente entendida. Assim, devido aos poucos trabalhos desenvolvidos, a maioria das informações fornecidas no item subsequente, quanto aos mecanismos de transporte de massa, estão relacionadas a concretos convencionais, exceto quando indicado.

### 3.1.1 Mecanismos de transporte

A circulação de gases, líquidos e íons através do concreto é importante devido às suas interações com os constituintes ou da água presente nos poros, podendo alterar a sua integridade diretamente e indiretamente, o que leva à deterioração das estruturas. Esses movimentos, geralmente chamados de *penetração*, provêm das combinações de gradientes de pressão de ar ou água, de umidade e concentração ou temperatura das soluções (NILSSON, 1996). Dependendo da força motriz do processo e da natureza da matéria transportada, os diferentes processos de transporte de substâncias prejudiciais através do concreto são distinguidos como permeabilidade, absorção e difusão, conforme descritos nas subseções seguintes.

#### 3.1.1.1 Permeabilidade

A permeabilidade do concreto é definida como a taxa de fluxo de um fluido através de seus poros, quando uma pressão é aplicada (BASHEER *et al.*, 2001; CLAISSE, 2014). A lei de Darcy para fluxo laminar em um sistema poroso é usada para descrever o fluxo de fluidos não compressíveis (como a água) através dos poros do concreto, como mostrado na Equação 1.

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = \frac{K' \Delta p}{\eta L} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$\frac{dq}{dt}$  = taxa de fluxo de água (m<sup>3</sup>/s)

$A$  = área da seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>)

$K'$  = permeabilidade intrínseca do material (m<sup>2</sup>)

$\Delta p$  = diferença de pressão através da profundidade da amostra (N/m<sup>2</sup>)

$\eta$  = viscosidade dinâmica do fluido (N.s/m<sup>2</sup>)

$L$  = espessura da amostra (m)

O mecanismo de transporte predominante para qualquer estrutura individual depende do contexto ambiental. No caso da permeabilidade, uma pressão hidrostática constante é necessária, tornando este mecanismo de transporte mais aplicável a estruturas subaquáticas ou de retenção aquática (LEPECH E LI, 2009). Assim, a determinação da permeabilidade intrínseca (também chamada somente de *permeabilidade*) é viável quando há um fluxo contínuo de água. Ressalta-se que a permeabilidade intrínseca,  $K'$ , independe do fluido envolvido para sua determinação.

Os testes para medição da permeabilidade à água ou de vazão de gás são normalmente realizados em cilindros ou cubos, selados lateralmente e livre nas faces superior e inferior, no qual o fluido ou gás é aplicado sob pressão. Entretanto, há uma grande variabilidade nos resultados e ausência de um padrão para a metodologia de teste aplicada (EL-DIEB E HOOTON, 1995; LI E CHAU, 2000).

#### 3.1.1.2 Absorção

O transporte de líquidos em um sólido poroso devido à tensão superficial que atua nos capilares é chamado de absorção de água. No sistema de poros do concreto, este mecanismo depende da tensão superficial do material, densidade e viscosidade do líquido, estrutura de poros (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares) e do ângulo de contato entre o líquido e as paredes dos poros (KROPP *et al.*, 1995).

Conforme Basheer *et al.* (2001), a absorção de água no concreto seco é considerada através de dois parâmetros básicos, isto é, a massa de água que é necessária para sua saturação (*porosidade efetiva*) e a taxa de penetração da ascensão capilar (*sortividade* ou *absortividade*). Segundo Assiè *et al.* (2007), quanto menor for o tamanho dos poros, mais altas são as forças de capilaridade sobre a água. Assim, ensaios de absorção capilar também proporcionam uma indicação útil da estrutura de poros do concreto, já que conferem indícios quanto ao diâmetro dos poros.

Os procedimentos de teste para medir a *absortividade* consistem em expor uma superfície da amostra de concreto em contato com a água. A água absorvida e/ou a profundidade de absorção de água é medida em intervalos de tempo determinados. O coeficiente de absorção é calculado através do declive da curva de absorção inicial por unidade de área *versus* a raiz quadrada do tempo, obtida por análise de regressão linear. As principais normas utilizadas para determinação da taxa de absorção são ASTM C1585 (2004), BS EN 13057 (2002a),

RILEM TC 116-PCD-C (1999) e Método de Kelham (1988) adaptado por Gopalan (1996). As principais diferenças entre os padrões são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre os métodos para determinação da *absortividade* (adaptado de GRAEFF, 2011).

| <i>Norma</i>           | <i>ASTM C1582</i>  | <i>RILEM TC 116-PCD-C</i>  | <i>BS 13057</i>   | <i>Kelham/Gopalan</i>  |
|------------------------|--|--|---|--|
| Número de amostras     | 2  | 3  | 3   | 3  |
| Geometria das amostras | Cilíndricas<br>d = 100 mm<br>h = 50 mm   | Cilíndricas <sup>a</sup><br>d = 150 mm<br>h = 50 mm                            | Cilíndricas<br>d = 100 mm<br>h ≥ 20 mm e h > 3 x D <sub>max</sub>                           | Cilíndricas <sup>a</sup><br>d = 100 mm<br>h = 25 mm  |
| Procedimentos          | 3 dias em câmara (50°C e 80% U.R.)<br>15 dias em container selado a temp. de 23°C  | De acordo com o método da TC 116-PCD-A (1999)                                  | Seco em estufa a 40°C, mínimo de 7 dias até constância em massa                             | Seco em estufa a 110 ± 10°C, até constância em massa   |
| Tempo de ensaio        | 60s; 5, 10, 20, 30 e 60 min; 2, 3, 4, 5 e 6h; 1, 2 e 3 dias; 3 medições em 4 dias; 1 medição em 2 dias                               | 10 min, 1h, 4h e 24h   | 12 min, 30 min, 1h, 2h, 4h; 24h <sup>b</sup>  | 2, 5, 10, 15 e 30 min; 1, 2, 3, 6, 24, 48, 72 e 96h  |
| Resultados obtidos     | 1 – Absorção <sup>c</sup><br>2 – Coeficiente de absorção inicial <sup>d</sup><br>3 – Coeficiente de absorção secundário <sup>e</sup> | Quantidade água absorvida – nenhuma equação é fornecida para coef. de absorção | 1 – Absorção <sup>c</sup><br>2 – Coef. de absorção<br>3 – Coef. de resistência <sup>f</sup> | 1 – Absorção <sup>c</sup><br>3 – Taxa de absorção <sup>d</sup><br>2 – Resistência capilar <sup>f</sup> |

<sup>a</sup> amostras retangulares também são aceitas

<sup>b</sup> não é obrigatório. Outros períodos de leitura podem ser realizados desde que haja 6 leituras em 24 horas.

<sup>c</sup> absorção de água por unidade de área de acordo com fórmula especificada.

<sup>d</sup> antes da saturação da amostra – *coeficiente de absorção*, *sortividade* ou *absortividade*.

<sup>e</sup> após a saturação da amostra – mudança na inclinação da reta de absorção em função do tempo.

<sup>f</sup> relacionado com a profundidade de penetração de água na amostra após certo período de tempo.

Não há norma brasileira para determinação similar da taxa de absorção proposta pelas normas descritas acima. A norma brasileira NBR 9779 (2012) propõe a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade através do ganho de massa por área da seção transversal da amostra. Entretanto, a norma estabelece um padrão de ensaio diferente dos demais, em termos de dimensões do corpo de prova (d = 100 mm; h = 200 mm) e da não exigência de selagem lateral para fluxo unidirecional.

Já a norma brasileira NBR 9778 (2005), semelhante à ASTM C642 (2013), é proposta para determinação da absorção, massa específica e índice de vazios do concreto. Esta norma determina a quantidade de água necessária para o preenchimento da totalidade dos poros

acessíveis da amostra, fornecendo valores de absorção de água e índice de vazios em porcentagem, estando, portanto, relacionada com a *porosidade efetiva* do material.

Assim, foram escolhidos três métodos para análise da absorção dos concretos e compósitos estudados neste trabalho, isto é, as normas brasileiras NBR 9778 (2005) e NBR 9779 (2012) e, dentro dos métodos apresentados na Tabela 3, o método de Kelham (1988) adaptado por Gopalan (1996) por ser um método mais completo e de menor tempo de ensaio.

### 3.1.1.3 Difusão

A difusão é o processo pelo qual um íon pode atravessar um concreto saturado, sem qualquer fluxo de água, conduzido por um gradiente de concentração, ou seja, da região de maior concentração para a região de menor concentração (KROPP *et al.*, 1995; BASHEER *et al.*, 2001; CLAISSE, 2014). A difusão de íons ocorre, por exemplo, em estruturas localizadas em ambientes úmidos – que saturam os poros do concreto devido à adsorção<sup>3</sup> – e estruturas imersas em água (CEB, 1992). A primeira lei de Fick expressa o fenômeno de difusão em condições estacionárias:

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$F$  = fluxo de massa (kg/m<sup>2</sup>.s)

$D$  = coeficiente de difusão (m<sup>2</sup>/s)

$C$  = concentração (g/m<sup>3</sup>)

$x$  = distância (m)

Para as condições de estado não-estacionário, a concentração “ $C$ ” no local “ $x$ ” muda com o tempo, e a equação de equilíbrio, conhecida como a segunda lei de Fick, descreve a alteração de uma unidade de volume com o tempo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{Equação 3})$$

---

<sup>3</sup> Adsorção é um processo em que as moléculas de vapor de água se ligam a superfície dos poros devido a um excesso de energia. Este processo é dependente dos tamanhos dos poros e da umidade relativa do ambiente (CEB, 1992).

Onde:

$D$  = coeficiente de difusão (m<sup>2</sup>/s)

$C$  = concentração (g/m<sup>3</sup>)

$x$  = distância (m)

$t$  = tempo (tempo)

O coeficiente de difusão,  $D$ , pode ser constante ou uma função de diferentes variáveis, tais como tempo, temperatura, concentração, etc. Para  $D = \text{constante}$ , a solução para a Equação 3, dada a condição de contorno de  $C = C_{(0,t)}$  e a condição inicial de  $C = 0$  para  $x > 0$  e  $t = 0$ , é tida como:

$$C = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$C$  = concentração de cloretos na profundidade  $x$  no tempo  $t$  (kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  = concentração inicial de cloretos no concreto (kg/m<sup>3</sup>)

erf = função erro de Gauss

$x$  = profundidade da medição de cloretos (m)

$D$  = coeficiente de difusão (m<sup>2</sup>/s)

$t$  = tempo de exposição.

A difusão é o principal meio responsável pela entrada de cloretos no concreto, embora haja, também, a possibilidade de serem transportados através de outros mecanismos de transporte, tais como permeabilidade e absorção (HELENE, 1993; SAHMARAN *et al.*, 2007; ODRIOZOLA E GUTIÉRREZ, 2008). Para estruturas de concreto armado, o ingresso de cloretos é um dos principais problemas de transporte associados com a mobilização da difusão de íons cloretos. Portanto, este mecanismo e os métodos para sua determinação serão apresentados mais detalhadamente no item 3.2.

### 3.1.2 A influência das fibras nos mecanismos de transporte

A adição de fibras pode ajudar a manter uma permeabilidade mais baixa em concretos fissurados. Estudos realizados por Tsukamoto (1990) verificam que a permeabilidade em compósitos fissurados é proporcional à taxa de fluxo laminar entre duas placas paralelas. Esta taxa aumenta proporcionalmente com a distância entre as placas, ou seja, com a largura da fissura. Assim, o autor verificou que a incorporação de fibras produz menores larguras de

fissuras no concreto em comparação ao concreto simples, por conseguinte, menor permeabilidade. Da mesma forma, Stang e Aarre (1992) constataram que a incorporação de fibras no concreto leva a abertura de fissuras significativamente menores do que o observado em qualquer concreto convencional. O efeito destes fenômenos, através da adição de fibras, possibilita uma redução na permeabilidade de concretos fissurados a um nível semelhante obtido para concretos convencionais em estado não fissurado.

Conforme mencionado anteriormente, há uma lacuna no estudo da estrutura de poros de concretos reforçados com fibras. A grande maioria dos estudos tem como foco a análise da permeabilidade de concretos reforçados em estado fissurado (provocado através de pré-carregamentos), uma vez que a adição de fibras diminui a abertura de fissuras da matriz. Leung *et al.* (2005) investigaram a permeabilidade à água de concretos reforçados com fibras de aço, polipropileno e PVA com adição de 0,5% em volume, sem a indução de fissuras. Os resultados mostraram uma elevada variabilidade no coeficiente de permeabilidade. Os autores concluíram que a permeabilidade mais baixa para algumas amostras ocorre devido ao efeito da fibra sobre a redução das microfissuras internas no concreto (devido à retração, por exemplo), resultando no aumento da resistência à penetração de água. Todavia, este fato é dependente da aderência fibra/matriz, do consumo de cimento e da relação água/cimento.

Lepech e Li (2009) analisaram a permeabilidade do ECC (*Engineered Cementitious Composites*) reforçado com fibras de PVA em comparação a argamassas reforçadas com malhas de arame de aço. A permeabilidade foi medida em amostras íntegras e pré-carregadas, no qual o tamanho da abertura de fissuras foi variado. Os resultados mostram que, quando comparado com amostras de argamassa reforçadas fissuradas sob tensão uniaxial a 1,5% de deformação, o ECC apresenta permeabilidade até seis ordens de grandeza inferior. Em estado íntegro a permeabilidade do ECC em relação à argamassa também foi menor. Cabe ressaltar que as amostras possuíam composições diferentes, principalmente em relação ao consumo de cimento. As argamassas confeccionadas pelos autores, por possuírem um consumo maior, podem apresentar maiores quantidades e/ou dimensões de microfissuras internas devido à retração, quando comparadas ao ECC. Além disso, as fibras de PVA podem atuar de forma a minimizar as microfissurações oriundas da retração, auxiliando na diminuição de tais caminhos suscetíveis à percolação de água.

Em relação à determinação da absorção em concretos reforçados com fibras, no trabalho realizado por Roque *et al.* (2009), no qual foram estudados FRCs (*fiber reinforced concrete*)

com diferentes tipos de fibras (polipropileno, PVA, aço e celulose), a taxa de absorção foi maior para concretos reforçados com fibra de polipropileno em relação aos demais e, também, em relação ao concreto de referência. O autor explica que a zona de transição interfacial entre a fibra de polipropileno e a matriz, que são relativamente finas e longas e de natureza hidrofóbica, pode atuar como uma via de transporte de massa para a entrada de água. No entanto, para os ensaios de permeabilidade, as fibras de polipropileno reduziram os valores de coeficientes. Os autores afirmam que o transporte de massa por capilaridade nos FRCs foi muito mais rápido do que nos processos de difusão ou permeabilidade. Assim, concluem que a absorção por sucção capilar identifica-se como o mecanismo de transporte mais crítico para determinação de um método de danos efetivos condicionados e espessura efetiva do concreto.

O mecanismo de difusão também é influenciado pela presença das fibras no concreto. No entanto, a incorporação de materiais cimentícios suplementares (pozolanas e escórias ativas) tem, também, grande incidência sobre este mecanismo, já que, além de refinar a estrutura de poros do material, podem contribuir significativamente na combinação de cloretos, diminuindo a passagens destes para o seu interior. Tais influências serão mais bem detalhadas no item 3.2, a seguir.

### 3.2 AÇÃO DE CLORETOS

A penetração de cloretos é um dos principais mecanismos de degradação das estruturas de concreto armado, pois, quando ingressados, atravessando a camada de cobrimento, geram a despassivação da película protetora da armadura. Assim, o concreto deixa de estar protegido contra a corrosão quando este fator alia-se à presença de umidade e oxigênio (SAHMARAN *et al.*, 2007).

O transporte de cloretos é um fenômeno muito complexo, envolvendo potencialmente diferentes mecanismos, incluindo permeabilidade, difusão e absorção. Dependendo das condições, o transporte de cloretos pode ser acionado por um ou combinações destes três mecanismos. No caso da permeabilidade, a principal força motriz por trás do processo, é a presença de um gradiente de pressão. Já a absorção, conduzida por sucção capilar dos poros, é o processo de transporte predominante quando o concreto não saturado é exposto à solução de cloretos. A difusão, por sua vez, é o mecanismo de transporte mais comumente estudado. Quando o concreto saturado é exposto a uma solução de cloretos, um gradiente de concentração é criado entre a superfície do elemento de concreto e a solução de poros. Neste

caso, a difusão será o mecanismo de acionamento de transporte predominante (UJI *et al.*, 1990; STANISH *et al.*, 1997; BASHEER *et al.*, 2001).

Independente da fonte que ocasiona o ingresso de cloretos para o interior do concreto, estes podem estar presentes na solução de poros (livres na forma de íons na água dos poros), fisicamente aderidos à superfície dos produtos de hidratação (por exemplo, adsorvidos ao C-S-H), ou quimicamente ligados com o C<sub>3</sub>A (aluminato tricálcico) ou fase AFm, cujo produto da reação é conhecido como sal de Friedel, de formula química:  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (HARALD, 1998; ANIK *et al.*, 1997). De maneira geral, os íons cloretos ingressados na pasta de cimento endurecida, podem ser classificados em dois grupos: *cloretos livres*, presentes na solução de poros, e *cloretos combinados*, ligados a produtos de hidratação (FLOREA E BROUWERS, 2012). Somente os cloretos livres são os responsáveis por despассивar e provocar os mecanismos de corrosão, sendo o seu teor dependente da quantidade da fração total combinada com os produtos de hidratação (ISAIA E HELENE, 1995).

Segundo Talero *et al.* (2011), em misturas de cimento Portland comum, o composto anidro que reage quimicamente e mais rapidamente com os cloretos é o C<sub>3</sub>A. Nas misturas em que há a incorporação de materiais cimentícios suplementares, a formação do sal de Friedel está principalmente relacionada com o teor de alumina reativa de cada pozolana. Em seu trabalho, foi demonstrado que a taxa de formação de sal de Friedel devido à alumina reativa, é muito maior do que devido à combinação do C<sub>3</sub>A do cimento Portland comum. Assim, há uma formação rápida de sal de Friedel no primeiro caso, e uma formação lenta no segundo, em relação ao C<sub>3</sub>A.

Essas reações químicas e/ou físicas que ocorrem entre os cloretos penetrados no concreto e os compostos e/ou produtos de hidratação dos cimentos e pozolanas, podem afetar o processo de difusão no concreto. De acordo com Basheer *et al.* (2001), a segunda lei de Fick (Equação 3 apresentada no item 3.1.1.3) deveria ser estendida de forma a representar uma função de diferentes variáveis, uma vez que a reação desses produtos reduzem a concentração de íons cloretos móveis (livres) e, por conseguinte, a tendência de difusão. Em experimentos que não consideram, explicitamente, a ligação e combinação de cloretos, as estimativas errôneas são feitas usando a Equação 3. Por isso, frequentemente, um coeficiente “aparente” de difusão é deduzido a partir de experimentos que dependem do tempo *t*. Além disso, a difusão “pura” é adotada, algumas vezes, juntamente com capacidade de ligação, a fim de determinar o coeficiente de difusão.

Em suma, a medição do ingresso de cloretos no concreto e/ou do coeficiente de difusão, pode ser realizada através de três tipos de testes, isto é, teste de difusão em estado estacionário, teste de difusão em estado não estacionário e teste de migração do campo elétrico, os quais serão discutidos mais detalhadamente no item seguinte.

### 3.2.1 Medição do ingresso de cloretos no concreto

Existem dois tipos de experimentos de penetração naturais geralmente utilizados para medir os coeficientes de difusão de cloretos no concreto. O primeiro, conhecido como testes de difusão em estado estacionário, consiste em medições periódicas do teor de cloretos em uma amostra de concreto entre duas células que contenham uma solução de cloretos e uma solução isenta de cloretos. O procedimento é realizado até que um estado de equilíbrio seja alcançado. Neste caso, a primeira lei de Fick é adotada para determinação do coeficiente de difusão. O segundo tipo de experimento, conhecido como testes de difusão em estado não-estacionário, envolve a imersão de amostras de concreto em uma solução contendo íons cloretos durante um período específico, no qual um perfil ou profundidade de penetração de cloretos é medido. As amostras são seladas lateralmente para que o fluxo ocorra de forma unidirecional. O coeficiente de difusão é calculado de acordo com a segunda lei de Fick (SAVAS, 1999; BASHEER *et al.*, 2001; SHI *et al.*, 2012).

Os testes de penetração natural, tanto no estado estacionário como não-estacionário, demoram longos períodos de tempo para serem realizados, especialmente para medição da difusão em misturas de concreto de alta qualidade. Assim, ensaios de migração elétrica tornaram-se populares, pois aceleram consideravelmente a entrada de cloretos no concreto, através da aplicação de gradientes de potencial elétrico (BASSHER *et al.*, 2001; SHI *et al.*, 2012).

Existe uma gama de ensaios normalizados e propostos por pesquisadores para a medição do ingresso de cloretos no concreto, como os apresentados no trabalho de Stanish *et al.* (1997). Dependendo do objetivo do teste e do processo de avaliação, ensaios de migração podem simplesmente focar na carga elétrica passante em uma amostra, durante um período de tempo, como proposto, por exemplo, pelas normas ASTM C1202 (2012) ou AASHTO T277 (2005). A Tabela 4 sumariza alguns dos principais métodos utilizados para medição do ingresso de cloretos no concreto, divididos em duas categorias, isto é, testes de longa duração (difusão) e de curta duração (migração). Cabe ressaltar que os métodos diferem entre si em relação à

geometria das amostras, solução de cloretos e, no caso dos testes de migração, da tensão elétrica aplicada. Testes naturais de difusão no estado estacionário, não são apresentados.

Tabela 4 – Comparação entre os métodos de penetração de cloretos no concreto.

| <i>Método</i> | <i>Regime</i>                     | <i>Temp. constante</i> | <i>Influência de condutores<sup>(a)</sup> no concreto</i> | <i>Tempo de ensaio</i> | <i>Resultados obtidos</i>                              |  |
|---------------|-----------------------------------|------------------------|---|------------------------|--|--|
| Longa duração | ASTM C1543, ou AASHTO T259        | NE*                    | Sim   | Não                    | 90 dias pós cura e condicionamento                     | 1) Perfil de cloretos<br>2) Coeficiente de difusão<br>3) Concentração de cloretos                    |
|               | NT BUILD 443                      | NE*                    | Sim   | Não                    | 40 – 120 dias depois da cura e condicionamento         |  |
|               | ASTM C1556, ou DD CEN/TS 12390-11 | NE*                    | Sim   | Não                    | 90 dias pós cura e condicionamento                     |  |
| Curta duração | ASTM C1202, ou AASHTO T277        | E**                    | Não   | Sim                    | 6 horas  | Carga elétrica passante  |
|               | Técnica de Migração Elétrica      | E**                    | Sim   | Sim                    | Depende da tensão e do tipo de concreto <sup>(b)</sup> | 1) Movimento de íons cloreto <sup>(c)</sup><br>2) Coeficiente de difusão <sup>(d)</sup>              |
|               | Teste Rápido de Migração (CHT)    | E**                    | Sim   | Sim                    | 8 horas  | 1) Profundidade de penetração de cloretos <sup>(e)</sup><br>2) Coeficiente de difusão <sup>(d)</sup> |

\*NE – Regime não-estacionário; \*\*E – Regime estacionário

<sup>(a)</sup> Reforço de aço, fibras condutoras (aço ou carbono) ou componentes iônicos na solução de poros ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ , etc.).

<sup>(b)</sup> O ensaio é encerrado quando o estado estacionário é atingido.

<sup>(c)</sup> Movimento sob um campo elétrico regido pela equação de Nernst-Planck (Andrade, 1993).

<sup>(d)</sup> Determinado através da equação de Nernst-Planck (Andrade, 1993) ou Nernst-Einstein (Lu, 1997).

<sup>(e)</sup> Profundidade de penetração determinada através de técnica colorimétrica (solução de nitrato de prata).

Para melhor compreender a medição do ingresso de cloretos nos experimentos citados, cabe ressaltar que, existem dois tipos de coeficientes de difusão utilizados, sendo um deles obtido a partir de testes no estado estacionário, usando a difusão ou migração, e outro obtido através de testes no estado não-estacionário. Estes coeficientes são chamados na literatura de *coeficiente de difusão efetivo* ( $D_{\text{eff}}$ ) ou *coeficiente de difusão aparente* ( $D_{\text{app}}$ ), respectivamente. É importante salientar que o  $D_{\text{eff}}$  representa apenas o transporte iônico, enquanto que o  $D_{\text{app}}$  leva em consideração a ligação de cloretos com as fases do cimento. Tal diferença é muito importante quando se tenta usar esses valores para previsão do período de início da corrosão e ao comparar diferentes métodos de ensaio. Assim, qualquer cálculo do  $D_{\text{eff}}$  obtido a partir de valores de resistividade da equação modificada de Nernst-Einstein (Andrade, 1993) ou a partir da equação modificada de Nernst-Planck (ANDRADE, 1993; LU, 1997), leva a um valor que não pode ser utilizado diretamente para previsão da vida útil. Por outro lado, valores de  $D_{\text{app}}$

obtidos a partir de experimentos que levam em consideração a ligação de cloretos, podem ser utilizados para fins de predição, desde que outros fatores, como idade do concreto ou concentração externa de cloretos, sejam levados em conta (ANDRADE *et al.*, 2000). Portanto, o coeficiente de difusão efetivo ( $D_{\text{eff}}$ ) não será considerado no presente trabalho e as equações de Nernst-Einstein e Nernst-Planck não serão apresentadas.

Assim, foram escolhidos dois métodos para análise do ingresso de cloretos nos concretos e compósitos estudados, isto é, a ASTM C1202 (2012) e a norma europeia DD CEN/TS 12390-11 (2009). Apesar de muito criticado, o método proposto pela ASTM C1202, segundo Stanish *et al.* (1997), foi adotado como um padrão de teste e é amplamente utilizado na literatura. Iaia (1995) ressalta que o método apresenta vantagens por ser de fácil execução, rapidez na obtenção dos resultados e aplicação a quase todos os tipos de concreto, em especial quando se deseja comparar os resultados de misturas alternativas com uma de referência. O método proposto pela norma europeia DD CEN/TS 12390-11 foi adotado por utilizar geometria de amostras menores do que os demais testes de longa duração apresentados na Tabela 4, tornando-se assim, um método de mais fácil execução.

### 3.2.2 Teor crítico de cloretos no concreto

O limite crítico de cloretos, denominado  $C_r$ , designa um valor no qual o teor de cloretos, à profundidade das armaduras, é suficiente para que se inicie o processo de propagação da corrosão. O valor de  $C_r$  é resultante do equilíbrio entre os *cloretos livres* e *cloretos combinados* (fisicamente aderidos/adsorvidos e quimicamente ligados) presentes no concreto. De acordo com Alonso *et al.* (1997), não há consenso entre a comunidade científica em relação ao limite crítico de cloretos que efetivamente ocasiona a despassivação da armadura, já que tal fato é dependente da quantidade de fatores que influenciam os fenômenos de transporte e absorção de cloretos no concreto, tais como temperatura, umidade relativa (condições de saturação dos poros), pH da solução de poros, teor de cloretos solúveis, quantidade de  $C_3A$  no cimento, fonte de cloretos e as características metalúrgicas da armadura. Ainda assim, algumas normas de diferentes países apresentam limites máximos de cloretos que servem como referência e orientação, conforme mostra a Tabela 5.

O *Building Research Establishment*<sup>4</sup>, mencionado por Figueiredo (2011), considera, em relação à quantidade de cloretos por massa de cimento, baixo risco de corrosão (para valores

---

<sup>4</sup> BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **The durability of steel in concrete: part I: mechanism of protection and corrosion.** Garston, Building Research Establishment Digest, Digest 263, 7 p., Jul. 1982.

inferiores a 0,4%), risco intermediário de corrosão (para valores entre 0,4% e 1,0%) e alto risco de corrosão (para quantidades superiores a 1,0%). Trejo e Pillai (2003) também indicam, através de dados experimentais, que valores limites para teor de cloreto entre 0,30 a 0,71 kg/m<sup>3</sup> de concreto, já são suficiente para despassivação da armadura.

Tabela 5 – Teor limite de cloreto para diversas normas (FIGUEIREDO, 2011).

| <i>NORMA</i>    | <i>PAÍS</i> | <i>ANO</i> | <i>TEOR DE CLORETOS RECOMENDADO</i>  |
|-----------------|-------------|------------|--|
| NBR 6118 (ABNT) | Brasil      | 2014       | Não se reporta ao teor de cloretos.  |
| ACI 318S-05     | USA         | 2005       | $\leq 0,15$ % em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos.<br>$\leq 0,3$ % em relação à massa de cimento, em ambiente normal.<br>$\leq 1$ % em relação à massa de cimento, em ambiente seco.<br>$\leq 0,06$ % em relação à massa de cimento (concreto protendido). |
| CEB             | Europa      | 1991       |  |
| NP EM 206-1     | Portugal    | 2007       | 0,40 % em relação à massa de cimento.  |
| BS 8110:1       | Inglaterra  | 1985       |  |
| JCSE-SP2        | Japão       | 1986       | $\leq 0,60$ kg/m <sup>3</sup> de concreto.   |

### 3.2.3 A influência das fibras no ingresso de cloretos no concreto

Conforme mencionado anteriormente, a incorporação de materiais cimentícios suplementares refina a estrutura de poros do concreto, diminuindo a interconectividade dos canais capilares, ocasionando, conseqüentemente, uma redução na porosidade do material. A cinza de casca de arroz, em particular, reduz significativamente a porosidade que influencia na penetração de agentes agressivos e que levam à deterioração da matriz de concreto (SARASWATHY E SONG, 2007; GIVI *et al.*, 2010).

Por outro lado, sabe-se também que as fibras podem ser caminhos que facilitam a percolação de água devido à porosidade existente na sua zona de transição com a matriz cimentícia. Todavia, dentre as fibras não-corrosivas, a eficácia da fibra de polipropileno no melhoramento da resistência à corrosão de vigas tem sido relatada por diversos autores (AL-TAYYIB E AL-ZAHRANI, 1990; SANJUAN *et al.*, 1997; HADDAD E ASHTEYATE, 2001). Estudos adicionais utilizando técnicas de migração elétrica em concretos reforçados com fibras de polipropileno (FRC), também têm mostrado resultados que variam desde um efeito desprezível (AL-TAYYIB E AL-ZAHRANI, 1990), até um beneficiamento significativo (TOUTANJI *et al.*, 1998; ZHANG E LI, 2006). Além disso, no trabalho de Antoni e Saeki (2005), os concretos reforçados com fibra de polipropileno (FRC) também apresentaram boa resistência à penetração de cloretos mesmo sob a aplicação de cargas mecânicas.

Em relação ao ECC (*Engineered Cementitious Composites*), um estudo realizado por Sahmaran *et al.* (2007), com a utilização de fibras de PVA e cinza volante, mostrou que, sob a imposição de altas deformações de flexão, os compósitos ECC pré-carregados revelaram microfissuras menores do que 50  $\mu\text{m}$  e um coeficiente de difusão significativamente mais baixo do que os obtidos nas argamassas de comparação, armadas e pré-carregada de modo semelhante. Mesmo em estado íntegro, o ECC apresentou redução no coeficiente de difusão de 36% em comparação à argamassa armada. No trabalho de Lin *et al.* (2011), seis diferentes misturas de ECC foram testadas e comparadas a um concreto convencional de 40 MPa (resistência à compressão). Como resultados, os autores obtiveram para a mistura de ECC padrão, uma redução de 20% no coeficiente de difusão quando comparado ao concreto convencional. O coeficiente foi reduzido, ainda, em 10,5% quando a incorporação de cinza volante foi aumentada ou quando aditivo superplastificante é adicionado.

### 3.3 RETRAÇÃO

A retração tem sido apontada como um dos principais processos que levam o concreto à fissuração, contribuindo, também, para o ingresso de agentes agressivos. Há muitas variáveis que influenciam na retração do material, geralmente separadas em grupos relacionados à composição da mistura (relação água/cimento, quantidade de massa, etc.) e à condição de exposição (tempo de cura, umidade, temperatura, etc.). O fenômeno está associado, frequentemente, com o movimento de água para fora dos poros do concreto, mas pode, ainda, estar relacionado à carbonatação e hidratação do cimento. Segundo Neville (2003), os diferentes processos que causam o fenômeno são classificados como: retração plástica, retração autógena, retração por secagem, retração diferencial e retração por carbonatação.

A retração plástica é causada pela rápida evaporação de água, a partir da superfície do concreto, quando o mesmo se encontra no estado plástico (durante a pega, antes do ganho de resistência). Conforme Wang *et al.* (2001), este processo ocorre quando a taxa de evaporação excede a taxa de exsudação e o concreto começa a contrair-se. O fenômeno acontece geralmente em climas quentes, regiões de baixa umidade relativa e ventosas, podendo, também, ser provocado pela sucção de uma base seca, como o solo. Em suma, este tipo de retração está associado às pressões desenvolvidas nos poros capilares do concreto durante a evaporação.

A retração autógena é causada pelo consumo de água nos poros do concreto devido à hidratação do cimento. Nesta fase, a importância da capilaridade e a retração plástica decrescem, tomando seu lugar a retração autógena, que ocorre quase que totalmente após a pega do concreto (WANG *et al.*, 2001). Assim, este tipo de retração não está relacionado com o movimento de umidade no interior do concreto, sendo mais acentuada nas primeiras idades.

A retração por secagem é um processo de longo prazo, causado pela evaporação da água capilar e adsorvida nos poros do concreto, sendo este último responsável por variações volumétricas, em alguns casos irreversíveis. Este fenômeno é mais acentuado nas primeiras idades, devido a grande quantidade de água livre disponível e da menor quantidade de produtos hidratados. A retração por secagem depende principalmente do tamanho da superfície exposta, da relação água/cimento e do tipo e quantidade de agregados presentes no concreto (NEVILLE, 2003).

Retração diferencial é um tipo de retração por secagem causada devido a um gradiente de umidade em superfícies de concreto, que podem causar deformações no elemento. Neste caso, a água dos poros perto da superfície do elemento exposto ao ambiente, é mais propensa à evaporação do que a água dos poros situada no interior do concreto. Este fato gera tensões de tração na superfície do concreto e tensões de compressão na parte inferior. Este comportamento é comumente observado em pavimentos de concreto, devido a grande área de superfície em relação ao volume de material (ZHANG E LI, 2001).

A retração por carbonatação ocorre devido à combinação do hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$  e do silicato de cálcio hidratado  $C-S-H$  do cimento, com o dióxido de carbono  $CO_2$  do ar, formando, além da água e outros compostos, o carbonato de cálcio  $CaCO_3$ , o qual possui um volume maior do que os compostos originais do cimento hidratado. Este fenômeno gera um aumento de massa e volume, e reduz a porosidade da superfície do concreto, o que leva a retração diferencial entre as superfícies expostas e o interior do material (NEVILLE, 2003).

### 3.3.1 O efeito das fibras e adições na retração do concreto

Conforme mencionado anteriormente, é possível compreender que, em ambos os estados (fresco e endurecido) a pasta de cimento tende a retrair devido à evaporação da água da mistura, ao processo natural de hidratação em si, ou devido à remoção da água fisicamente adsorvida a partir das camadas de C-S-H. Como a alteração de volume acontece de qualquer forma, o material desenvolve tensões de retração que podem levar a fissurações. Assim, entre

as diferentes soluções propostas para controlar a fissuração por retração de concretos, a utilização de fibras distribuídas aleatoriamente, como as de aço ou polipropileno, funcionam como uma ponte de transferência de esforços entre as fissuras, impedindo-as de crescer (BANTHIA *et al.*, 1996).

As fibras sintéticas têm sido utilizadas em materiais de concreto desde o final dos anos 60. Alguns trabalhos têm mostrado que as fibras de polipropileno atuam contra a formação de fissuras de retração plástica (PARDON E ZOLLO, 1990; BAYASI E MCLNTYRE, 2002; QI *et al.*, 2003). Kovler *et al.* (1991) ressaltam que, no caso do emprego de fibras de polipropileno, a sua importância não está na diminuição da retração, e sim na diminuição do efeito da fissuração, ou seja, no aumento do número de fissuras de menores dimensões. No entanto, Wang *et al.* (2001) afirmam que, além de limitar a propagação de fissuras, a adição de fibras também pode ocasionar mudanças na estrutura de poros, influenciando na retração plástica do material. De acordo com os autores, as fibras aumentam a quantidade de poros maiores em comparação a um concreto simples, o que reduz a pressão capilar e contribui para a redução da exsudação e retração plástica. A quantidade de poros maiores está provavelmente situada na zona interfacial entre as fibras e a matriz cimentícia. Além disso, fibras finas e pequenas, como as de polipropileno, tendem a apresentar um maior volume de zonas interfaciais em comparação a fibras maiores, como as de aço. Espera-se, neste caso, que o concreto com fibras pequenas mostre melhor desempenho em termos de retração plástica do que um concreto simples. Todavia, cabe ressaltar que, um aumento do diâmetro dos poros do concreto, devido à adição de fibras de polipropileno, mesmo sendo benéfico na redução da retração plástica, pode ser responsável pela maior retração por secagem, como relatado por Aly *et al.* (2008). Este fato pode afetar a durabilidade, já que aumenta a porosidade e permeabilidade do concreto.

Em relação ao ECC (*Engineered Cementitious Composites*), no qual não há presença de agregados graúdos e um maior teor de cimento é utilizado juntamente com uma baixa relação água/materiais cimentícios (geralmente da ordem de 0,30), Sahmaran e Li (2009) afirmam que um dos principais problemas com o compósito é a sua maior tendência à fissuração nas primeiras idades, o que é uma consequência do aumento da retração autógena do material. Os autores explicam que, em idades mais avançadas, uma vez que as cargas mecânicas são aplicadas ao material, a relação entre a tensão de fissuração *versus* abertura de fissuras ( $\sigma-\delta$ ) é suficientemente desenvolvida para resistir a qualquer fissura localizada, devido à forte ponte gerada pela fibra associada à forte ligação interfacial. No entanto, em idades mais precoces, a

curva  $\sigma$ - $\delta$  não foi totalmente desenvolvida para resistir às tensões internas e, assim, deformações autógenas podem levar a formação de algumas microfissuras ( $>100 \mu\text{m}$ ). Estas pequenas fissuras não comprometem as propriedades mecânicas dos compósitos, todavia podem afetar sua durabilidade em longo prazo. Técnicas tradicionais de cura não são eficientes na eliminação de fissuras precoces, uma vez que o transporte de água no compósito é dificultado pela compactação da matriz.

No trabalho de Zhang *et al.* (2013), foi estudada a retração (livre e restringida) de compósitos ECC com e sem a utilização de cinza volante, chamados de LSECC (*low shrinkage ECC*) e ECC tradicional, respectivamente. Os resultados mostram que a retração do LSECC é substancialmente reduzida. Para a retração livre, a retração do ECC tradicional sob condições de secagem é três vezes maior que o obtido para o LSECC sob as mesmas condições de cura. Na retração restringida, no qual foi utilizado o teste do anel (ver item 3.3.2), não foi observada nenhuma fissura no corpo de prova de LSECC, enquanto que a amostra de ECC tradicional obteve inúmeras fissuras dispostas, com início aos 7 dias de ensaio. Os resultados também mostraram deformações bem menores obtidas pelo LSECC em comparação ao ECC tradicional. Para o LSECC, o valor estacionário de deformação foi de  $50 \mu\text{m/m}$ , alcançado 56 dias após o início do ensaio. Já para o ECC tradicional, o valor estacionário de deformação foi de  $100 \mu\text{m/m}$  e alcançado cerca de 14 dias após a moldagem do anel.

Em geral, as adições minerais podem diminuir a exsudação e segregação do concreto, ocasionando a diminuição da retração por secagem. Além disso, a contribuição das adições minerais é evidente na diminuição do calor de hidratação gerado, principalmente, em amostras que contenham grandes quantidades de cimento. Este fator também pode contribuir para a diminuição da retração inerente do concreto e, portanto, na redução das microfissurações internas geradas pelo fenômeno. No caso da cinza de casca de arroz, relata-se que, normalmente, a mesma tende a diminuir a retração autógena de matrizes de cimento (RIZWAN, 2006; SENSALE *et al.*, 2008; NGUYEN, 2011). No entanto, Habeeb e Fayyadh (2009) indicam que a utilização de uma cinza de casca de arroz extremamente fina pode resultar no aumento da retração em comparação a uma amostra padrão.

### 3.3.2 Ensaios para medição da retração no concreto

Existem basicamente dois diferentes métodos para determinação da resistência à retração do concreto, isto é, ensaios de retração livre e ensaios de retração restringida. O primeiro método

de ensaio permite com que a amostra retraia independentemente, sem nenhuma restrição externa. Neste caso, não há a presença de fissuras induzidas por restrição de movimento, e sim apenas as microfissuras internas geradas pela retração intrínseca de cada material. Já o segundo método, é baseado na restrição de movimentação da amostra de concreto, de modo que as tensões de tração induzidas levem a abertura de fissuras. Neste caso, a resistência à tração e a capacidade de propagação de fissuras também são levadas em conta. Assim, este último método torna-se mais interessante na avaliação da influência da adição de fibras na retração, uma vez que as mesmas tendem a controlar a fissuração do concreto.

A retração livre pode ser medida de acordo com inúmeras normas, como BS EN 12617-4 (2002), BS ISO 1920-8 (2009), ASTM C341 (2013), ASTM C157 - 08(2014)e1 e ABNT NBR 15261 (2005). A norma brasileira, todavia, é restrita para argamassas não incluindo o teste para corpos de prova de concreto. Em suma, os métodos baseiam-se na medição da alteração do comprimento das amostras em determinados períodos de tempo sob condições de temperatura e umidade controladas. Assim, dentre os métodos apresentados acima, escolheu-se o mais atual proposto pela ASTM C157 – 08(2014)e1 para medição da retração livre.

Para medição da retração restringida, existem alguns métodos propostos normalizados e não-normalizados. Estes incluem: o ensaio do anel (1), uma amostra linear com extremidades ancoradas (2), uma amostra linear situada entre um gancho móvel e um gancho fixo, de tal modo que uma restrição completa seja alcançada pelo retorno da garra móvel para sua posição inicial após a retração (3) e uma placa de amostra no qual o sistema de retenção é fornecido em duas direções ortogonais (4) (BANTHIA *et al.*, 1995). Dentre eles, os únicos regidos por normas, atualmente, são os ensaios (1) e (4) pelas ASTM C1581 (2009) e ASTM C1579 (2006), respectivamente. O ensaio do anel, dentre os apresentados, é o mais comum e, portanto, escolhido para o presente trabalho. O método baseia-se na medição das deformações e fissurações causadas pelas tensões de compressão geradas quando o concreto tende a retrair-se, ao estar aderido a um anel de aço. As deformações são medidas através de extensômetros (*strain gages*) contidos no interior do anel.

### 3.4 ABRASÃO

A abrasão é outro fator de grande relevância na durabilidade, principalmente em estruturas marítimas e pavimentos. Em relação à primeira, Graham Jr. (1998) afirma que o desgaste gerado é mais frequentemente causado pela ação de partículas imersas na água (silte, areia,

cascalho e outras partículas sólidas) que colidem e causam a erosão da superfície do concreto. No caso de pavimentos de concreto, o desgaste da superfície ocorre devido à ação cíclica das rodas do tráfego de veículos e, também, pela fricção gerada por partículas. A ação abrasivo-erosiva nessas estruturas representa um dever contínuo na manutenção, fato que deve ser levado em conta na concepção da escolha do material a ser empregado. Em suma, os principais fatores que afetam a resistência à abrasão do concreto, em ambos os casos, estão relacionados ao tipo de agregado utilizado, resistência à compressão, acabamento da superfície e o tipo de cura adotada (LIU, 1994; ACI, 2001).

A ordem de grandeza dos danos gerados pela ação abrasivo-erosiva pode acarretar na perda de alguns centímetros da massa de concreto, mas, em alguns casos, após anos de ação, pode ser significativamente elevada. Ações abrasivo-erosivas fracas, não representam um grande problema, porém, quando muito pronunciadas colocam em risco a integridade estrutural do concreto, bem como a funcionalidade da estrutura.

#### 3.4.1 O efeito das fibras e adições na abrasão do concreto

Visando suprir os problemas relacionados à degradação das estruturas devido ao desgaste abrasivo, vários pesquisadores demonstraram que concretos produzidos com adições minerais (sílica ativa, cinza volante, escória de alto-forno, basalto moído) (LUI, 2007; BINICI *et al.*, 2009; YEN *et al.*, 2007; CAVDAR E YETGIN, 2010) e adição de fibras de polipropileno (Li *et al.*, 2006; SADEGZADEH *et al.*, 2003; HORSZCZARUK, 2009) apresentam melhores resultados de resistência à abrasão em comparação a concretos convencionais sem adições ou fibras.

A incorporação de fibras de aço é, também, muitas vezes, usada no caso de cargas de choque e cargas variáveis múltiplas em estruturas hidráulicas. No entanto, Horszczaruk (2009) evidencia que a sua utilização não melhora a resistência à erosão de concretos de alta resistência submetidos à ação abrasiva de baixa velocidade. Em contrapartida, as fibras de polipropileno utilizadas pelo mesmo autor, causaram um aumento da resistência à abrasão dos concretos durante as primeiras 48 horas de ensaio.

Em relação ao ECC (*Engineered Cementitious Composites*), com adição de cinza volante e fibras de PVA, Li e Lepech (2005) demonstraram sua grande eficiência, através de ensaios de abrasão, utilizando a metodologia do Departamento de Transporte de Michigan (*Michigan Department of Transportation*). O ensaio consiste na determinação da força de atrito entre

uma roda e a superfície umidificada do material. O valor da força de atrito, chamado de *Aggregate Wear Index* (AWI), é determinado em um intervalo de  $4 \times 10^6$  passadas de rodas sobre o material. Os autores realizaram testes em diferentes tipos de acabamentos superficiais de rodagem moldados com ECC, no qual foram obtidos valores entre 1,6 e 2,3 kN. Cabe ressaltar que o valor mínimo requerido pelo departamento é de 1,2 kN. Sendo assim, os pesquisadores concluíram que o ECC torna-se apropriado para aplicações em rodovias com elevado volume de tráfego de veículos.

### 3.4.2 Testes para medição da abrasão no concreto

Atualmente, existem quatro principais métodos de ensaio propostos pela ASTM para avaliar a resistência do concreto sujeito a vários tipos de ações abrasivas. A ASTM C418 (2012) simula a abrasão transmitida pela água através de uma espécie de injetor de areia de sílica com alta velocidade de jato de ar. A ASTM C779 (2012) é dividida em três tipos de teste para simular o tráfego em pavimentos: (a) máquina giratória de disco, (b) máquina de rodas, e (c) máquina de rolamento de esferas. A ASTM C944 (2012) é, também, um ensaio para simulação do tráfego de pavimentos, porém produz um efeito abrasivo muito mais rápido do que os outros métodos de ensaio. O aparelho de ensaio é constituído por um cortador rotativo e uma prensa de perfuração. Por fim, a ASTM C1138 (1997) avalia a resistência das superfícies de concreto submetidas à ação abrasiva de partículas à base de água em estruturas hidráulicas, como bacias de dissipação e obras de saída. Em suma, os resultados obtidos para todos os ensaios baseiam-se na perda de atrito pela diferença de massa ou da profundidade média de desgaste. A Tabela 6 apresenta um guia geral das possíveis aplicações de cada procedimento para as diferentes categorias de abrasão, correlacionando a gravidade do desgaste com a ação abrasiva especial a cada um dos métodos de ensaio.

Tabela 6 – Aplicação dos testes de abrasão (BAKKE, 2014).

| <i>Tipo de abrasão</i>   | <i>ASTM C418</i> | <i>ASTM C779</i> |          |          | <i>ASTM C944</i> | <i>ASTM C1138</i> |
|--|------------------|------------------|----------|----------|------------------|-------------------|
|  |                  | <i>A</i>         | <i>B</i> | <i>C</i> |                  |                   |
| Tráfego de pedestres, ou leve a médio tráfego de rodas de pneus, etc.  |                  | X                |          |          | X                |                   |
| Empilhadeira, tráfego pesado de rodas de pneus, automóveis com correntes, tráfego pesado de rodas de aço, pneus com pregos, etc. |                  |                  | X        | X        | X                |                   |
| Erosão abrasiva de partículas em estruturas hidráulicas.   | X                |                  |          |          |                  | X                 |

Além dos métodos apresentados acima, existe, ainda, outro método voltado à determinação do potencial de resistência à degradação para concreto permeável. Este método, regido pela ASTM C1747 (2013), consiste na medição da perda de massa de amostras submetidas à ação combinada de impacto e abrasão num tambor rotativo de aço, conhecido como máquina de abrasão Los Angeles.

### 3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo sintetiza alguns problemas relacionados à durabilidade de concretos convencionais e compósitos cimentícios com a utilização de fibras. Em face do que foi descrito, nota-se que os mecanismos em comum a todos os fatores destacados tratam-se do processo de fissuração e estrutura de poros do material, que são o meio do ingresso de agentes agressivos. De fato, tais fatores de degradação encontram-se ligados entre si, atuando como causador ou consequência da ação.

Em síntese, a retração do concreto pode gerar microfissurações e, até mesmo, fissuras em maiores escalas quando sua movimentação térmica é restringida, assim como a ação abrasivo-erosiva também gera desgastes e fissuras que, ambos os casos, alteram a permeabilidade do concreto, podendo contribuir para a entrada de substâncias nocivas. A estrutura de poros do concreto, por sua vez, é afetada por estes tipos de fenômenos que, em sua totalidade, dependem de inúmeros fatores relacionados à composição do concreto utilizado, como relação água/cimento, resistência mecânica, adições minerais, presença de fibras e/ou agregados, etc. Todos estes fatores, aliados, definem a durabilidade da estrutura e interferem na escolha do material mais adequado à sua composição frente às necessidades usuais.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvido um programa experimental que possibilitasse a análise de fatores que afetam a durabilidade dos compósitos estudados, levando em consideração o meio no qual são aplicados, seja para reforço de estruturas de concreto armado, seja na construção de novos pavimentos e recapeamento de pavimentos existentes. Este capítulo aborda, portanto, o programa experimental estabelecido, expondo os materiais, equipamentos, procedimentos e normas adotadas.

### 4.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA

As variáveis da pesquisa, descritas na Tabela 7, foram definidas de acordo com os objetivos estabelecidos neste trabalho, que consistem em avaliar alguns fatores responsáveis pela degradação dos compósitos estudados, conforme sua aplicação em estruturas e pavimentação. Os compósitos estudados consistem em duas misturas, uma sem substituição de cimento por cinza de casca de arroz e outra considerando a substituição de 30% de cimento pela cinza sem controle de queima, conforme justificado no item 2.3.2.2. Além disso, para os ensaios que abrangem a estrutura de poros do material, assim como o ensaio de penetração acelerada de cloretos, o compósito com cinza de casca de arroz foi analisado aos 28 e 91 dias, já que existe a possibilidade de as reações pozolânicas da cinza de casca de arroz ocorrer desde as primeiras idades até os 90 dias de cura. Os demais foram ensaiados apenas aos 28 dias.

Para que os resultados obtidos representem o nível de durabilidade dos compósitos, os mesmos foram comparados a concretos convencionais aplicados em estruturas de concreto armado (resistência à compressão média de 25 MPa) e pavimentos rígidos (resistência à tração na flexão média de 5 MPa). Cabe ressaltar que o objetivo principal deste trabalho é analisar a durabilidade dos compósitos, sendo que os valores obtidos nos ensaios para os concretos foram utilizados apenas para obtenção de um patamar referencial de durabilidade.

Tabela 7 – Resumo das variáveis utilizadas na pesquisa.

| <i>Descrição</i>                  | <i>Variável</i> |
|-----------------------------------|-----------------|
| Compósito cimentício              | 0%              |
| (teor de cinza de casca de arroz) | 30% (em volume) |
| Idade do compósito com            | 28 dias         |
| cinza de casca de arroz           | 91 dias         |

|                  |  |
|------------------|--|
| Tipo de concreto | Concreto-Estrutural, $f_{cm} = 25$ MPa |
|                  | Concreto-Pavimento, $f_{cm} = 5$ MPa   |

## 4.2 ESPECIFICAÇÕES DOS TRAÇOS E PROCEDIMENTO DE MISTURA

Neste item são especificados os traços e proporções da mistura dos compósitos e concretos estudados, bem como os procedimentos utilizados nas misturas de cada um. A definição dos traços para os concretos foram baseados na utilização convencional. O traço para concreto estrutural foi determinado de modo a obter valores de resistência à compressão média de 25 MPa. Cabe salientar que resistências entre 20 e 30 MPa são bastante utilizadas em edifícios em geral. O traço para pavimento, dimensionado em função da resistência à tração na flexão, foi definido de modo a obter um valor médio de 5 MPa, concebendo o valor mínimo exigido para aplicação em pavimentos rígidos.

O traço utilizado para os compósitos cimentícios foi desenvolvido ao longo dos anos no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS), a partir da adaptação dos traços consagrados do material, criado por Kanda (1998), Redon *et al.* (2001), Matsumoto (2002), Kunieda e Rokugo (2006), Wang e Li (2007) e Yang (2008). Ressalta-se que, diferentemente dos concretos, os compósitos cimentícios de elevada deformação utilizados neste trabalho, são compostos apenas por cimento, areia, fibras e aditivo.

A nomenclatura adotada para designação de cada traço encontra-se na Tabela 8. As proporções das misturas dos compósitos cimentícios, com e sem a utilização de cinza de casca de arroz (CCA), e dos concretos (estrutural e pavimento) podem ser visualizadas na Tabela 9.

Tabela 8 – Nomenclatura utilizada na designação dos traços.

| <i>Denominação</i>           | <i>Código</i> |
|------------------------------|---------------|
| Compósito cimentício sem CCA | ECC-REF       |
| Compósito cimentício com CCA | ECC-CCA       |
| Concreto Estrutural          | CE            |
| Concreto Pavimento           | CP            |

Tabela 9 – Proporções das misturas.

| <i>Código</i> | <i>Quantidade de material (kg/m<sup>3</sup>)</i> |            |                   |                    |              |              |                |             |
|---------------|--|------------|-------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
|               | <i>Cimento</i>                                   | <i>CCA</i> | <i>Areia fina</i> | <i>Areia média</i> | <i>Brita</i> | <i>Fibra</i> | <i>Aditivo</i> | <i>Água</i> |
| ECC-REF       | 1009,16  | -          | 757,53            | -                  | -            | 17,90        | 7,05           | 348,55      |
| ECC-CCA       | 706,41   | 204,43     | 757,53            | -                  | -            | 17,90        | 7,05           | 348,55      |
| CE            | 286,59   | -          | -                 | 859,76             | 1146,34      | -            | -              | 186,28      |
| CP            | 422,00   | -          | 406,80            | 610,20             | 958,40       | -            | 2,80           | 164,00      |

Os compósitos cimentícios foram produzidos em um misturador mecânico para argamassas com capacidade de aproximadamente 15 litros. A ordem de mistura dos materiais seguiu a seguinte sequência: materiais secos (cimento, areia e cinza da casca de arroz, quando utilizada), água e aditivo e, por fim, a fibra de polipropileno, adicionadas parcialmente em um intervalo de dois minutos. O misturador permaneceu em velocidade de rotação baixa durante a colocação de todos os materiais. Após a colocação dos mesmos, a rotação do misturador foi alterada para a velocidade máxima, misturando os materiais por um período de mais três minutos, de modo a propiciar a dispersão total das fibras e uma mistura homogênea. Os corpos de prova de ECC foram moldados utilizando-se os mesmos procedimentos (número de camadas, número de golpes, etc.) realizados nos concretos. Os tempos e método de cura para cada ensaio, assim como os procedimentos de moldagem, encontram-se descritos no item 4.4.

Os concretos foram produzidos em betoneira de eixo vertical, seguindo a ordem de mistura: agregado graúdo, cimento e um pouco de água; após uma rápida mistura destes materiais, foi colocado o restante da água, o agregado miúdo e aditivo superplastificante, no caso do concreto para pavimento. Ao final de cada mistura realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (1998). Os valores de abatimento para o concreto estrutural e pavimento foram de 100 mm e 40 mm, respectivamente. Os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova são particulares para cada ensaio e apresentam-se descritos no item 4.4.

### 4.3 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste item são apresentados os materiais empregados para confecção dos corpos de prova de concreto, bem como dos compósitos cimentícios utilizados na pesquisa.

### 4.3.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho consiste em um cimento Portland de alta resistência inicial, classificado como CP V-ARI. Esta propriedade é conseguida através da utilização de uma dosagem diferenciada de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Sua composição é formada por 95 a 100% de clínquer e gesso e 0 a 5% de calcário e cinza volante. A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos referentes ao cimento utilizado neste trabalho.

Tabela 10 – Ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento CP V-ARI MAX.

| <i>Ensaios Químicos</i>                |                    |           |                             |
|--|--------------------|-----------|-----------------------------|
| Ensaios                                | UN.                | Resultado | Exigências                  |
| Resíduo Insolúvel - RI                 | %                  | 0,7       | ≤ 1,0 - NM 15/12            |
| Perda ao Fogo - PF                     | %                  | 3,57      | ≤ 4,5 - NM 18/12            |
| Óxido de Magnésio - MgO                | %                  | 1,36      | ≤ 6,5 - NM 21/12            |
| Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>  | %                  | 2,65      | ≤ 4,5 - NM 16/12            |
| Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>   | %                  | 2,55      | ≤ 3,0 - NM 20/12            |
| <i>Ensaios Físicos</i>                 |                    |           |                             |
| Ensaios                                | UN.                | Resultado | Exigências                  |
| Área Específica (Blaine)               | cm <sup>2</sup> /g | 4.575     | ≥ 3.000 - NM 76/98          |
| Massa Específica                       | g/cm <sup>3</sup>  | 3,09      | não aplicável - NM 23/01    |
| Índice de Finura - #75 µm (n°200)      | %                  | 0,02      | ≤ 6,0 - NBR 11579/13        |
| Resíduo na Peneira #325                | %                  | 0,4       | não aplicável - NBR 9202/85 |
| Água de consistência normal            | %                  | 31,4      | não aplicável - NM 43/03    |
| Início de Pega                         | minutos            | 139       | ≥ 60 - NM 63/03             |
| Fim de Pega                            | minutos            | 198       | ≤ 600 - NM 65/03            |
| Expansibilidade à quente               | mm                 | 0,00      | ≤ 5,0 - NBR 11582/12        |
| <i>Ensaios Mecânicos - NBR 7215/96</i> |                    |           |                             |
| Ensaios                                | UN.                | Resultado | Exigências                  |
| Resistência à Compressão - 1 dia       | MPa                | 29,8      | 14                          |
| Resistência à Compressão - 3 dias      | MPa                | 42,5      | 24                          |
| Resistência à Compressão - 7 dias      | MPa                | 48,2      | 34                          |
| Resistência à Compressão - 28 dias     | MPa                | 57,2      | não aplicável               |

Fonte: Brennand Cimentos, 2014.

### 4.3.2 Cinza da casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada na confecção dos compósitos cimentícios, de cor predominantemente preta (Figura 12), é utilizada como combustível no processo de

parboilização dos grãos de arroz de uma indústria localizada no estado do Rio Grande do Sul. A cinza resultante provém de um processo de queima não controlada.



Figura 12 – Cinza de casca de arroz sem controle de queima.

Para substituição parcial do cimento nos compósitos cimentícios, esta cinza teve sua granulometria reduzida através de um processo de moagem de 8 horas, com o emprego de um moinho de bolas<sup>5</sup>. A Tabela 11 apresenta as características físicas e químicas da cinza de casca de arroz utilizada neste trabalho após o processo de moagem.

Tabela 11 – Características químicas e físicas da cinza de casca de arroz (CCA).

| <i>Característica física e química</i> |       |                                    |       |
|--|-------|------------------------------------|-------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )  |       | 2,06                               |       |
| Perda ao fogo (%)                      |       | 13,99                              |       |
| Índice de atividade pozolânica (%)     |       | 162,48                             |       |
| <i>Composição química</i>              |       |                                    |       |
| SiO <sub>2</sub> (%)                   | 82,21 | MnO (%)                            | 0,34  |
| K <sub>2</sub> O (%)                   | 1,85  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,10  |
| CaO (%)                                | 0,75  | SO <sub>3</sub> (%)                | 0,19  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)     | 0,48  | CO <sub>2</sub> (%)                | 12,96 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)      | 0,65  |                                    |       |

Fonte: RIGHI, 2015.

<sup>5</sup> O moinho de bolas utilizado neste trabalho possui 310 mm de altura e 275 mm de diâmetro. O mesmo contém 75 bolas de 38 mm de diâmetro que são utilizadas no processo de moagem.

### 4.3.3 Agregado miúdo

#### 4.3.3.1 Areia fina

Para confecção dos compósitos cimentícios e do concreto aplicado em pavimentos, utilizou-se uma areia fina de origem natural, do tipo quartzosa. A Tabela 12 descreve suas características granulométricas (de acordo com a NBR NM 248, 2003) e massa específica (de acordo com a NBR NM 52, 2009), seguida da sua curva granulométrica representada na Figura 13, em conjunto com os limites de zona ótima e utilizável estabelecidas pela NBR NM 248 (2003).

Tabela 12 – Composição granulométrica da areia fina.

| <i>Abertura das peneiras (mm)</i>     | <i>% Retida</i> | <i>% Retida acumulada</i> |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| 4,8                                   | 0,40            | 0,40                      |
| 2,4                                   | 0,30            | 0,70                      |
| 1,2                                   | 0,40            | 1,10                      |
| 0,6                                   | 0,40            | 1,40                      |
| 0,3                                   | 3,30            | 4,70                      |
| 0,15                                  | 53,90           | 58,60                     |
| Fundo                                 | 37,60           | 100                       |
| TOTAL                                 | 100             | -                         |
| Módulo de finura                      |                 | 0,69                      |
| Dimensão máxima característica (mm)   |                 | 0,30                      |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) |                 | 2,52                      |

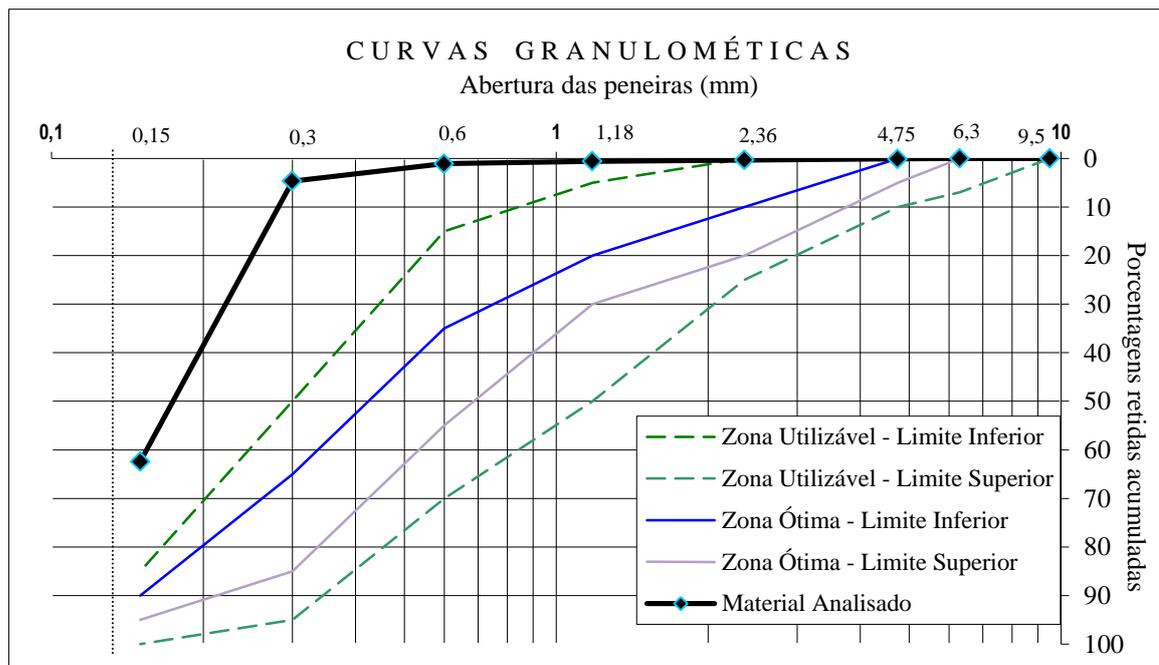


Figura 13 – Curva granulométrica da areia fina.

#### 4.3.3.2 Areia média

Na confecção do concreto simples, utilizado convencionalmente em estruturas de concreto armado e, também, do concreto para pavimentos rígidos, utilizou-se uma areia média, proveniente do Rio Jacuí da cidade de Porto Alegre/RS. Suas características granulométricas (de acordo com a NBR NM 248, 2003) e massa específica (de acordo com a NBR NM 52, 2009) encontram-se na Tabela 13. A curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 14, em conjunto com os limites de zona ótima e utilizável estabelecidas pela NBR NM 248 (2003).

Tabela 13 – Composição granulométrica da areia média.

| <i>Abertura das peneiras (mm)</i>     | <i>% Retida</i> | <i>% Retida acumulada</i> |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| 4,8                                   | 0,00            | 0,00                      |
| 2,4                                   | 3,29            | 3,29                      |
| 1,2                                   | 8,57            | 11,86                     |
| 0,6                                   | 7,43            | 19,29                     |
| 0,3                                   | 46,43           | 65,71                     |
| 0,15                                  | 32,00           | 97,71                     |
| Fundo                                 | 2,29            | 100                       |
| TOTAL                                 | 100             | -                         |
| Módulo de finura                      |                 | 1,98                      |
| Dimensão máxima característica (mm)   |                 | 2,40                      |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) |                 | 2,63                      |

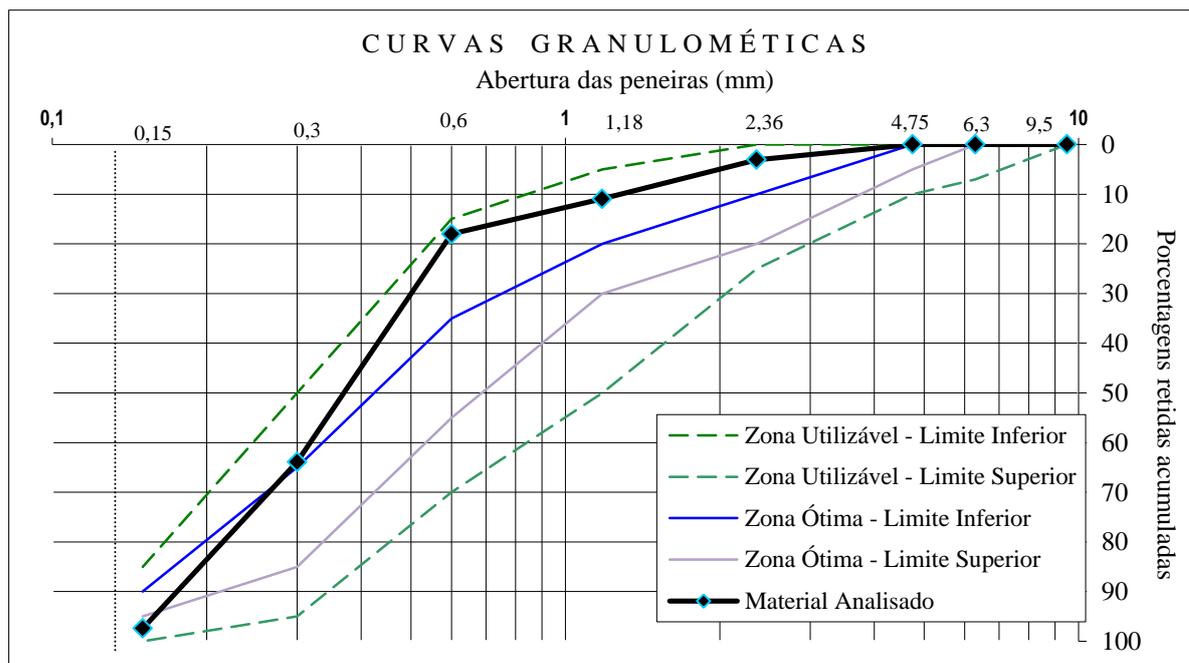


Figura 14 – Curva granulométrica da areia média.

#### 4.3.4 Agregado graúdo

Nos concretos simples e para pavimentos, foi utilizada, como agregado graúdo, uma rocha basáltica britada. As suas características físicas (de acordo com a NBR NM 53, 2009) e granulométricas (de acordo com a NBR NM 248, 2003) são mostradas na Tabela 15. A curva granulométrica é representada na Figura 14, em conjunto com os limites de zona estabelecidos pela NBR NM 248 (2003).

Tabela 14 – Composição granulométrica da brita.

| <i>Abertura das peneiras (mm)</i>     | <i>% Retida</i> | <i>% Retida acumulada</i> |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| 25                                    | 0,00            | 0,00                      |
| 19                                    | 6,10            | 6,10                      |
| 12,5                                  | 60,31           | 66,42                     |
| 9,5                                   | 30,63           | 97,05                     |
| 6,3                                   | 0,00            | 97,05                     |
| 4,75                                  | 2,95            | 100                       |
| Fundo                                 | 0,00            | 100                       |
| TOTAL                                 | 100             | -                         |
| Módulo de finura                      |                 | 7,03                      |
| Dimensão máxima característica (mm)   |                 | 25                        |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) |                 | 2,909                     |
| Absorção de água (%)                  |                 | 1,982                     |

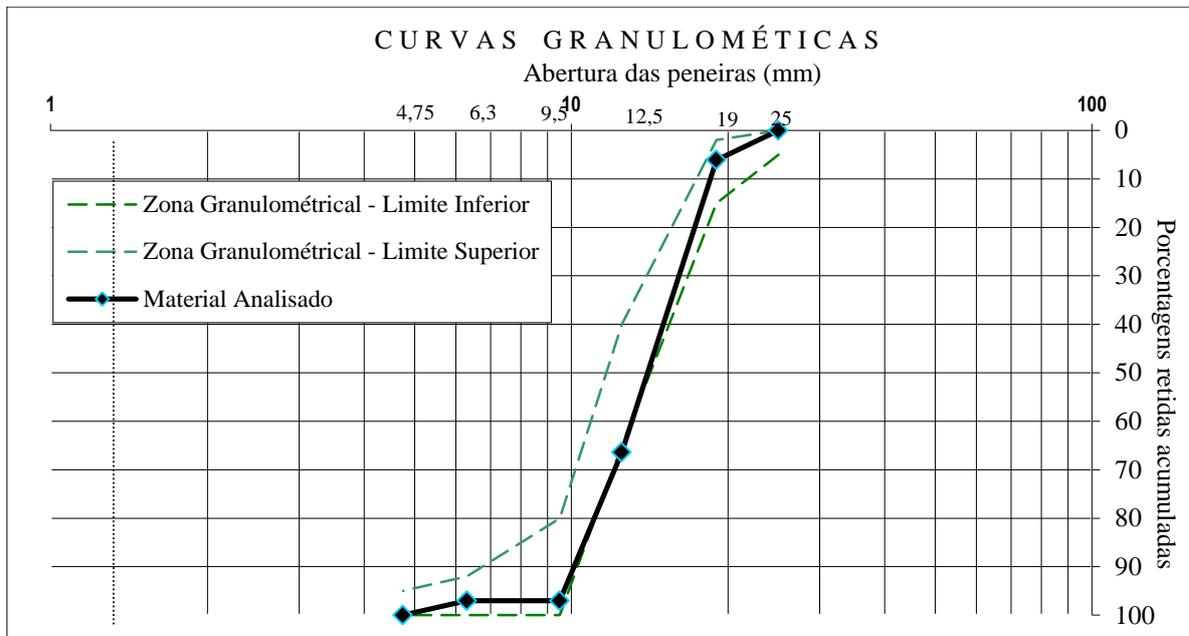


Figura 15 – Curva granulométrica da brita.

#### 4.3.5 Fibra de polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas para confecção dos compósitos cimentícios são produzidas e encontram-se disponível comercialmente no Brasil, diferentemente das fibras de PVA e polietileno, usadas quando da concepção do ECC, no qual seriam necessárias importações.

As fibras utilizadas neste trabalho são do tipo monofilamento (Figura 16) e possuem 10 mm de comprimento, produzidas pela empresa Brasilit – Saint-Gobain. A Tabela 15 apresenta suas propriedades físicas e mecânicas.



Figura 16 – Fibra de polipropileno monofilamento.

Tabela 15 – Características da fibra de polipropileno.

| <i>Propriedades</i>            |           |
|--------------------------------|-----------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 0,91      |
| Comprimento (mm)               | 10        |
| Diâmetro (µm)                  | 12        |
| Resistência à tração (MPa)     | 850       |
| Enlongamento na ruptura (%)    | 21        |
| Módulo de elasticidade (GPa)   | 6         |
| Resistência à Álcalis          | Excelente |

Fonte: GARCEZ, 2009.

#### 4.3.6 Aditivos

Para confecção dos compósitos cimentícios foi utilizado aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico, de nome comercial GLENIUM 3200 PF. Já para a confecção do concreto para pavimento rígido, foi utilizado um aditivo superplastificante, de nome comercial ADVA 527.

## 4.4 MÉTODOS E ENSAIOS

Neste item são descritos os diversos ensaios empregados na pesquisa. A combinação dos experimentos selecionados para integrar o programa experimental visa obter parâmetros que quantifiquem e qualifiquem os compósitos cimentícios quanto à sua durabilidade, comparando-os a concretos convencionais utilizados em estruturas de concreto armado e, também, a concretos usuais aplicados a pavimentos rígidos.

### 4.4.1 Estrutura de poros

Nos itens subsequentes são descritos os diversos ensaios realizados para análise da estrutura de poros. Cabe ressaltar que os ensaios foram realizados aos 28 dias para todos os concretos e compósitos, e aos 91 dias apenas para os compósitos com cinza de casca de arroz, visto que espera-se que as reações pozolânicas da cinza ocorram desde as primeiras idades até os 90 dias de cura, conforme evidenciado por Cordeiro *et al.* (2007).

#### 4.4.1.1 Absortividade

O ensaio de absortividade foi realizado de acordo com o método proposto por Kelham (1988) e adaptado por Gopalan (1996). O ensaio consiste na sucção capilar de água de um corpo de prova de concreto não-saturado ao longo do tempo. Neste ensaio, a pressão resultante da água sobre o corpo de prova é desprezada, uma vez que se trata de uma pressão inferior à pressão resultante das tensões nos capilares. As variáveis de resposta do ensaio incluem a taxa de penetração de água (absortividade) e resistência capilar.

As amostras seguiram a preparação prévia recomendada por Kelham (1988). Todavia, as espessuras das mesmas foram reduzidas de 50 mm para 25 mm, conforme sugerido por Gopalan (1996). Segundo o autor, as reduções das espessuras das amostras aumentam a precisão dos testes, pois reduzem os erros nas medições, além de diminuir o tempo total de ensaio. A preparação das amostras e os procedimentos estão descritos a seguir:

- Foram moldados dois corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x comprimento). Após 28 dias (e também 91 dias para ECC-CCA) de cura em câmara climatizada, os corpos de prova foram serrados em fatias de 25 milímetros de espessura. Foram selecionadas 5 fatias para cada traço, sendo 3 do primeiro e 2 do segundo corpo de prova. As fatias foram retiradas do centro, descartando-se a fatia de topo, desconsiderando, assim, o efeito parede;

- De posse das amostras, as mesmas foram pesadas e colocadas em estufa ( $110 \pm 10^\circ\text{C}$ ) até sua constância em massa (diferença de 0,1% entre massas, em um período de 24 horas);
- Após constância em massa, as fatias foram mantidas em dessecador com sílica gel por um período de aproximadamente 24 horas, para que fossem resfriadas à temperatura ambiente sem a possibilidade de absorção de umidade;
- Depois de resfriados, os corpos de prova tiveram suas laterais impermeabilizadas com silicone e uma membrana látex; na sequência, uma tampa de PVC como uma mangueira plástica no centro foi colocada na parte superior da amostra, afastada 2 mm da face e colada com selante de poliuretano PU (Figura 17). Ressalta-se que a função da mangueira é manter o contato da amostra com a atmosfera, garantindo o equilíbrio de pressão;
- Depois de 24 horas em dessecador, para garantir a secagem da colagem e vedação dos corpos de prova, os mesmos foram colocados em imersão e pesados em balança hidrostática (Figura 18), em períodos de 2, 5, 10, 15 e 30 minutos, 1, 2, 3, 6, 24, 48, 72 e 96 horas. O ensaio é prosseguido até a saturação total do corpo de prova;
- O nível d'água durante a pesagem e imersão dos corpos de prova foi mantido constante.

Os valores de massa acumulados são plotados em um gráfico em função da raiz quadrada do tempo. A partir deste gráfico, é possível a interpolação de duas retas, sendo a primeira de absorção inicial e a segunda de saturação. A intersecção destas duas retas, ponto no qual a fase de absorção passa a ser de saturação, é denominado ponto de saturação ou *nick point*. A taxa de absorção (em  $\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$ ) é obtida através do quociente da inclinação da reta correspondente a fase de absorção inicial dividido pela área da seção transversal do corpo de prova. A resistência capilar é determinada pelo quadrado da divisão do valor do *nick point*, no eixo das abcissas, pela espessura média do corpo de prova, em metros.



(a) Colocação de selante poliuretano PU para colagem da tampa de PVC



(b) Encaixe da tampa de PVC a 2 mm da face do corpo de prova

Figura 17 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio de absorvidade.



(a) Corpos de prova em imersão



(b) Pesagem em balança hidrostática

Figura 18 – Execução do ensaio de absorvidade.

#### 4.4.1.2 Absorção e índice de vazios

Os valores de absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos e compósitos estudados neste trabalho foram determinados conforme os preceitos estabelecidos pela NBR 9778 (2005). Para tanto, foram moldados três corpos de prova de 10 x 20 cm (diâmetro x comprimento) para cada traço, mantidos em cura em câmara úmida por um período de 28 dias (e também 91 dias para ECC-CCA) até a data de ensaio.

O ensaio consiste na secagem das amostras e determinação da sua massa na condição seca. Após esta primeira etapa, os corpos de prova são saturados e, então, medidas suas massas na condição saturada e imersa em água. A absorção de água consiste na razão entre as diferenças

de massa (saturada e seca) pela massa seca do corpo de prova. O índice de vazios pode ser obtido através da razão entre as diferenças de massas saturada e seca, pela diferença de massas saturada e imersa. Por fim, calculam-se as massas específicas da amostra seca, saturada e real. A Figura 19 apresenta a execução do ensaio.



(a) Procedimento de saturação dos corpos de prova



(b) Determinação das massas dos corpos de prova

Figura 19 – Execução do ensaio de absorção e índice de vazios.

#### 4.4.1.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de capilaridade realizado nos concretos e compósitos seguiram os princípios designados pela NBR 9779 (2012). Este ensaio consiste na determinação da absorção de água através da ascensão capilar. Para tanto foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x comprimento) para cada traço estudado. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida por 28 dias (e também 91 dias para ECC-CCA) até a data de ensaio.

O método para determinação da absorção de água por capilaridade consiste em manter o corpo de prova em contato com uma lamina d'água de 5 mm acima da sua face inferior (Figura 20-a), no qual suas massas são determinadas em períodos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas a partir do contato dos mesmos com a água. A razão da diferença entre as massas medidas nestes intervalos de tempo menos a massa do corpo de prova seco, pela área da sua seção transversal, fornece o valor de absorção de água por capilaridade em  $\text{g/cm}^2$ . A altura da ascensão capilar (em centímetros) foi medida rompendo-se os corpos de prova por compressão diametral, de modo a permitir a anotação da distribuição da água no seu interior (Figura 20-b). Os valores de capilaridade são plotados em um gráfico em função do tempo de ensaio realizado.



(a) Colocação dos corpos de prova em contato com lâmina d'água



(b) Medição da altura de penetração da água nos corpos de prova

Figura 20 – Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade.

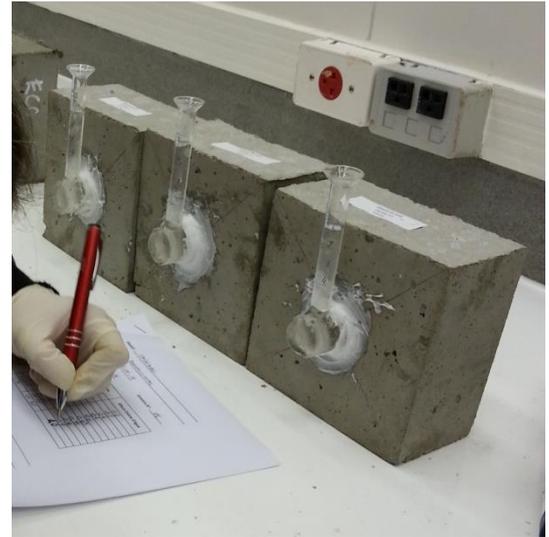
#### 4.4.1.4 Ensaio de absorção de água pelo método do cachimbo

O ensaio do cachimbo, também conhecido como ensaio da Pipeta RILEM (*Test Method II.4: Water absorption tube test*, 2006), proposto pelo pesquisador alemão Karsten, foi aprovado pela RILEM (*Reunion Internationale des Laboratoires d'essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions*) para o controle de infiltração em paredes. Este método foi adotado como complemento para análise da estrutura de poros dos concretos e compósitos estudados nessa pesquisa, uma vez que considera o “efeito parede”, simulando casos reais em estruturas de concreto.

Para realização do teste, foram moldados três corpos de prova prismáticos nas dimensões de 15 x 15 x 8 cm para cada traço estudado. Os corpos de prova foram mantidos em cura em ambiente climatizado a 23°C durante 28 dias (e também 91 dias para ECC-CCA), até a data de ensaio. Os cachimbos foram, então, acoplados no centro dos corpos de prova com silicone, conforme ilustra a Figura 21. Após 24 horas da colocação dos cachimbos, a fim de garantir a secagem e colagem, os mesmos foram preenchidos com água até o nível zero da graduação. A seguir foram realizadas leituras em intervalos de 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 minutos. Os valores de altura da coluna d'água são plotados em um gráfico em função do tempo de ensaio realizado.



(a) Preenchimento de água até o nível zero

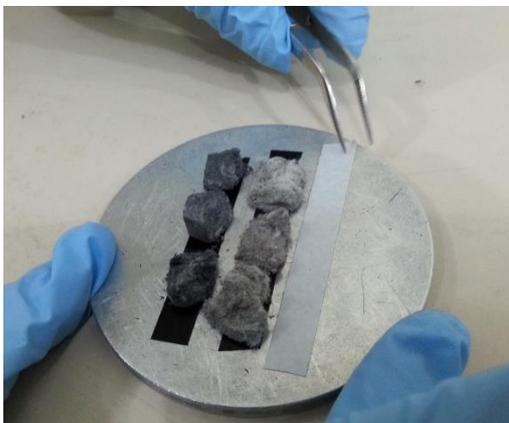


(b) Realização das leituras das colunas d'água

Figura 21 – Execução do ensaio de absorção de água pelo método do cachimbo.

#### 4.4.1.5 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução. Todavia, torna-se limitado pelo diâmetro do feixe de elétrons e o microvolume de interação com a amostra. Para obtenção das amostras de ensaio, foram cortados pedaços de corpos de prova dispostos sobre um adesivo de carbono (Figura 22a) e, posteriormente metalizados por uma fina camada de ouro. Neste trabalho, a microscopia eletrônica de varredura foi utilizada como um complemento ao estudo, para avaliar qualitativamente a estrutura de poros dos compósitos cimentícios. A Figura 22b mostra o microscópio eletrônico de varredura.



(a) Preparação das amostras



(b) Microscópio eletrônico de varredura.

Figura 22 – Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

#### 4.4.2 Ação de cloretos

Nos itens subsequentes são descritos os ensaios realizados para avaliação da ação de cloretos nos concretos e compósitos estudados. Os métodos adotados consistem em determinar a carga elétrica de penetração de íons cloretos e o coeficiente de difusão.

##### 4.4.2.1 Penetração de cloretos

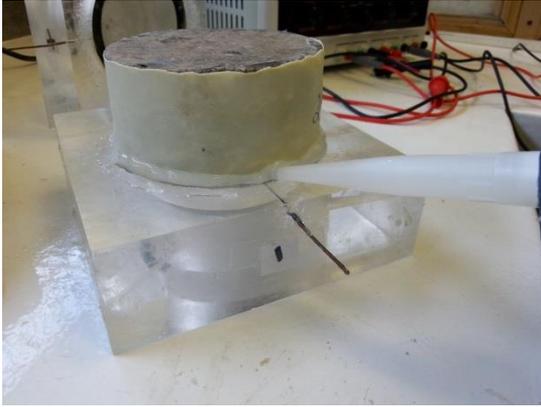
O ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, proposto pela ASTM C1202 (2012), consiste em medir a carga elétrica passante em uma amostra de concreto de dimensões 9,5 x 5,1 cm (diâmetro x altura), submetida a uma tensão de  $60 \pm 0,1$  V durante um período de 6 horas. A amostra cilíndrica é acoplada a meias-células de acrílico, no qual suas faces são expostas a uma solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração (em massa), e hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N. Entre as meias-células é gerada uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico.

Para obtenção da amostra de ensaio, foram serrados corpos de prova de concreto de 10 x 20 cm, utilizando-se as partes centrais e rejeitando-se as faces superior e inferior a fim de desconsiderar o efeito parede.

Ao completarem 28 dias (e também 91 dias para ECC-CCA) de cura, os corpos de prova foram submetidos a um pré-condicionamento, conforme descrito abaixo:

- Aplicação de uma membrana seladora na face curva do corpo de prova e sua secagem;
- Imersão dos corpos de prova em água deionizada por um período de 24 horas, visando a saturação dos poros.

Após a realização do condicionamento, as amostras foram secas superficialmente e acopladas às células para realização do ensaio (Figura 23). Durante o ensaio, a temperatura foi mantida constante em 23°C.



(a) Preparação das amostras



(b) Medição das correntes elétricas

Figura 23 – Execução do ensaio de penetração de íons cloretos.

A carga total passante pode ser obtida através da Equação 5. A partir disso, é possível classificar qualitativamente o concreto quanto ao risco de penetração de íons cloretos, conforme a Tabela 16, prevista na ASTM C1202.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

Q – carga total passante (coulombs);

$I_0$  – corrente (amperes) medida imediatamente após a aplicação da tensão;

$I_t$  – corrente (amperes) medida nos intervalos “t” em minutos.

Na utilização de um diâmetro distinto dos 95 mm proposto em norma, o valor da carga total passante deve ser ajustado segundo a Equação 6. O ajuste é feito multiplicando-se o valor da carga obtida pela relação das áreas transversais da amostra padrão e a utilizada. Levando em consideração o diâmetro de 100 mm correspondente aos corpos de prova utilizados na pesquisa, a carga total passante teve seu valor ajustado através da equação proposta.

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$Q_s$  – carga total passante (coulombs) pela amostra de diâmetro correspondente a 95 mm;

$Q_x$  – carga total passante (coulombs) pela amostra de diâmetro correspondente a x mm;

x – diâmetro (mm) da amostra utilizada.

Tabela 16 – Classificação quanto ao risco de penetração de íons cloretos.

| <i>Carga passante</i> | <i>Risco de penetração de íons cloretos</i> |
|-----------------------|---|
| > 4000                | Alto  |
| 2000 a 4000           | Moderado                                    |
| 1000 a 2000           | Baixo                                       |
| 100 a 1000            | Muito baixo                                 |
| < 100                 | Desprezível                                 |

Fonte: ASTM C 1202, 2010.

De posse dos resultados de três amostras ensaiadas, adotou-se a média aritmética como valor representativo para a carga total passante. Através do valor obtido, classificou-se o risco de penetração de íons cloreto dos concretos estudados.

#### 4.4.2.2 Difusão de cloretos

O ensaio de determinação da resistência à ação de cloretos por difusão unidirecional foi realizado de acordo com a norma britânica CEN/TS 12390-11 (2010). O ensaio consiste em determinar a concentração inicial e final de cloretos em uma amostra, em regime não estacionário.

Para obtenção das amostras de ensaio, são moldados três corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x comprimento). Os corpos de prova são mantidos em cura saturada por um período de 28 dias. Aos 14 dias de idade, cada corpo de prova é serrado e dividido em duas sub-amostras, conforme ilustra a Figura 24. As sub-amostras obtidas são destinadas para determinar o perfil de cloretos e o teor inicial de cloretos. Depois de serradas, as amostras para determinação do perfil de cloretos são impermeabilizadas lateralmente com o uso de silicone e membrana látex. Na sequência, todas as amostras são armazenadas novamente em cura saturada em água deionizada por um período de mais 14 dias, até a data de ensaio.

Após 28 dias, as amostras para determinação do teor inicial de cloretos são testadas imediatamente, enquanto que as amostras de perfil são armazenadas em solução de hidróxido de cálcio durante um período de 18 horas. Após este período, as amostras são transferidas para o local de exposição, armazenadas em solução de 3% de cloreto de sódio (NaCl) durante 90 dias.

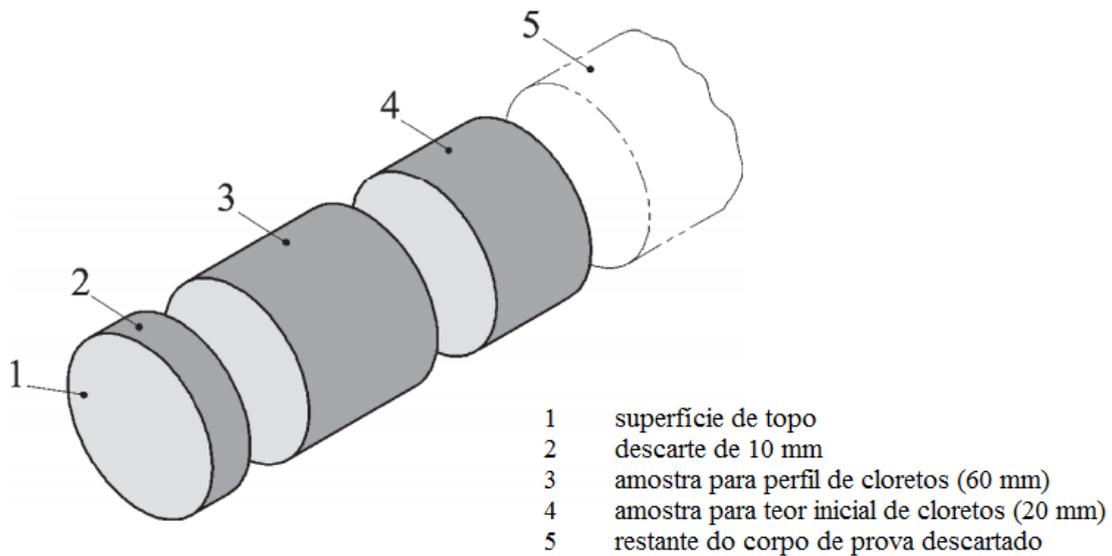


Figura 24 – Esquema da divisão do corpo de prova para teste de difusão de cloretos.

Para determinação do teor inicial de cloretos ( $C_i$ ), uma camada de 1 mm é retirada da superfície do corpo de prova, moída para obter uma amostra de 20g de pó e destinada a análise. O teor de cloreto solúvel em ácido é determinado de acordo com a norma EN 14629 (2007), expresso em porcentagem de massa de concreto.

Na determinação do perfil de cloretos, após 90 dias de exposição, oito camadas (de 1 mm de profundidade cada) são retiradas da amostra e trituradas a seco, conferindo amostras de 5g cada. O teor de cloreto solúvel em ácido é determinado de acordo com a norma EN 14629 (2007), expresso em porcentagem de massa de concreto. A partir da 2ª Lei de Fick, e através de uma regressão não-linear, é possível traçar o perfil de cloretos das amostras estudadas.

#### 4.4.3 Retração

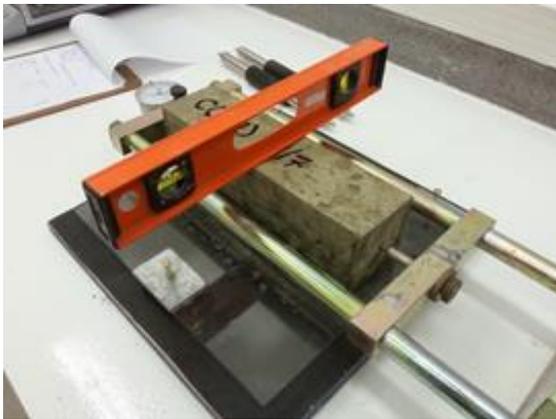
Nos itens subsequentes são descritos os ensaios de retração realizados nos concretos e compósitos estudados. Os métodos adotados consistem em determinar a retração nas condições livre e restringida.

##### 4.4.3.1 Retração livre

O ensaio de retração livre, realizado de acordo com a ASTM C157 (2008), consiste em avaliar a variação dimensional do material, desconsiderando o efeito alternado de temperatura, umidade e tensões de restrição. Foram utilizados pinos de aço inoxidável, aderidos às extremidades dos corpos de prova durante a pega, que possibilitam a medição da retração

através da variação do comprimento, obtida com o auxílio de um relógio comparador de resolução de 0,001 mm.

Para execução do ensaio, foram moldados três corpos de prova prismáticos de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm para cada traço estudado. As primeiras leituras foram realizadas 24 horas após a moldagem. Na sequência, os corpos de prova foram armazenados em câmara climatizada à temperatura de 23°C e umidade relativa de 50%. Prosseguiram-se as leituras nas idades de 4, 7, 14 e 28 dias. Para realização das leituras, os corpos de prova foram posicionados em uma mesa niveladora, a fim de reduzir a probabilidade de erros nas leituras. A Figura 25 ilustra a realização do ensaio.



(a) Nivelamento do corpo de prova



(b) Medição da variação dimensional

Figura 25 – Execução do ensaio de retração livre.

A retração (em mm/m) é calculada através da razão entre as diferenças de leituras (leitura efetuada na idade desejada e a leitura efetuada após a desforma) pelo comprimento de calibração, igual a 0,25 m. Os valores de retração são plotados em um gráfico em função da idade.

#### 4.4.3.2 Retração restringida

O ensaio de retração restringida foi realizado de acordo com a ASTM C1581 (2009). O ensaio consiste em determinar a idade de fissuração e as deformações causadas pela tensão de tração induzida em concretos/compósitos em situações de retração restringida. Este ensaio desconsidera a variação de temperatura e umidade.

Para realização do ensaio, é necessária a utilização de um anel de aço no qual a amostra de ensaio permanece em contato por 28 dias. As deformações ocasionadas pelas tensões de tração induzidas na amostra são medidas por quatro extensômetros (*strain gages*) instalados

no interior do anel de aço, e ligados a um sistema de aquisição de dados com resolução de 0,0000005 m/m. A Figura 26 mostra o detalhamento da fôrma de teste.

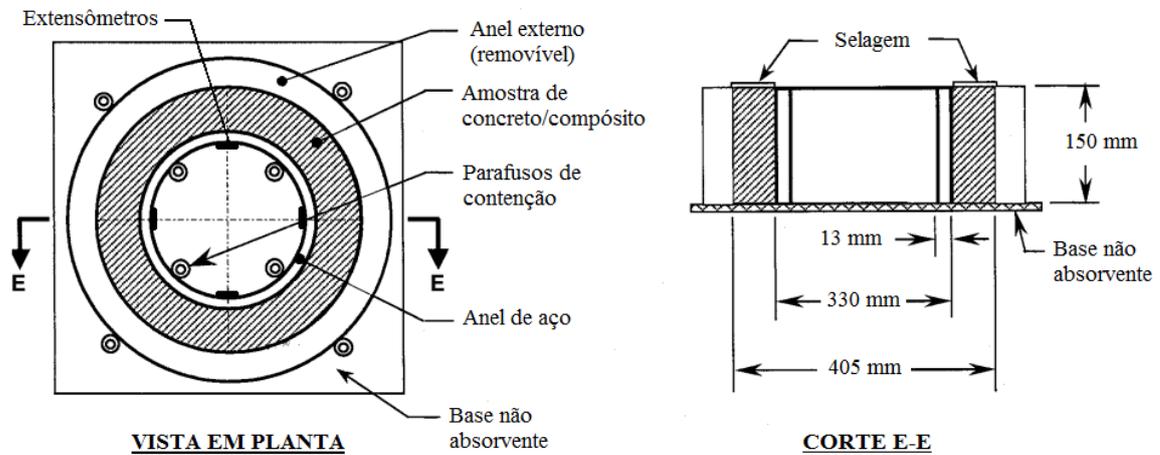


Figura 26 – Detalhamento do anel de retração restringida.

Após o lançamento do concreto no anel, o mesmo é transferido e armazenado, durante o tempo de ensaio, em uma câmara climatizada, no qual são mantidas constantes a temperatura e umidade relativa de 23°C e 50%, respectivamente. As medidas de deformação do anel são computadas no instante após o armazenamento em câmara climatizada. A cura nas primeiras 24 horas é realizada com a colocação de um pano molhado e filme de polietileno sobre o corpo de prova. Durante este período, a amostra permanece no molde, isto é, com a presença do anel externo. Após o período de cura e entre as medições de deformação, o anel externo é removido cuidadosamente. A superfície de topo é, então, selada com fita alumínio durante o período de teste. Para cada traço estudado foram confeccionados dois corpos de prova. A Figura 27 mostra a execução do ensaio.



(a) Corpo de prova em ensaio.



(b) Sistema de aquisição de dados.

Figura 27 – Execução do ensaio de retração restringida.

As deformações foram gravadas em intervalos de 10 minutos até 28 dias de ensaio. As deformações são plotadas em um gráfico em função da idade. A taxa de deformação ( $\text{mm}/\text{dia}^{1/2}$ ) é calculada como sendo a inclinação da reta, obtida por regressão linear, da deformação pela raiz quadrada do tempo. A taxa de tensão (MPa/dia) da amostra, calculada com base no momento de fissuração, é obtida através da Equação 7:

$$q = \frac{G |\alpha_{avg}|}{2 \sqrt{t_r}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$q$  – taxa de tensão em cada amostra de ensaio (MPa/dia);

$G$  – 72,2 GPa;

$|\alpha_{avg}|$  – valor da taxa média de deformação em cada amostra de ensaio ( $\text{mm}/\text{dia}^{1/2}$ );

$t_r$  – tempo de teste para cada corpo de prova (dias).

A partir dos dados obtidos de tempo até fissuração e taxa de tensão de deformação, é possível classificar qualitativamente o concreto quanto ao potencial de fissuração, conforme a Tabela 17, prevista na ASTM C1581.

Tabela 17 – Classificação do potencial de fissuração – Ensaio de retração restringida.

| <i>Tempo de ensaio, <math>t_{cr}</math> (dias)</i> | <i>Taxa de tensão média, <math>S</math> (MPa/dia)</i> | <i>Potencial de fissuração</i> |
|--|---|--------------------------------|
| $0 < t_{cr} \leq 7$                                | $S \geq 0,34$   | Alto                           |
| $7 < t_{cr} \leq 14$                               | $0,17 \leq S < 0,34$                                  | Moderado-Alto                  |
| $14 < t_{cr} \leq 28$                              | $0,34 \leq S < 0,10$                                  | Moderado-Baixo                 |
| $t_{cr} > 28$                                      | $S < 0,10$  | Baixo                          |

Fonte: ASTM C 1581, 2009.

#### 4.4.4 Abrasão

Para determinação da resistência à degradação por abrasão, adotou-se o ensaio utilizado para concreto permeável, prescrito pela ASTM C1747 (2013). Este método consiste na medição da perda de massa de amostras submetidas à ação combinada de impacto e abrasão num tambor rotativo de aço, conhecido como máquina de abrasão Los Angeles.

Devido à limitação de tempo e o custo necessário para a execução dos outros ensaios conforme mostrados na Tabela 6 (item 3.4.2), este método foi empregado a fim de servir

como base comparativa para a análise da perda de massa por abrasão entre os concretos e compósitos cimentícios estudados neste trabalho.

A máquina de abrasão Los Angeles é constituída de um tambor de aço, cilíndrico e oco de aproximadamente 500 mm de comprimento e 700 mm de diâmetro, cujo eixo horizontal permanece fixado a um dispositivo externo, que possibilita sua rotação. Não é aplicada nenhuma carga abrasiva por esferas de aço dentro do tambor. O desgaste é causado pelo contato entre os próprios corpos de prova que são colocados no interior da máquina.

Para realização do ensaio, foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x comprimento) para cada traço. Após 28 dias de cura, as amostras foram secas em estufa a 105°C até constância em massa. Na sequência, foram pesadas e submetidas ao ensaio de abrasão, no qual as amostras são colocadas na máquina concomitantemente. O tambor é girado a uma velocidade compreendida entre 30 rpm e 33 rpm, até completar 500 rotações. Após a execução do ensaio, as amostras foram novamente pesadas. A perda por abrasão, em porcentagem, dos três corpos de prova por traço, é determinada pela razão entre as diferenças de massas (final e inicial) pela massa inicial. A Figura 28 mostra a execução do ensaio.



(a) Máquina de abrasão Los Angeles.



(b) Pesagem das amostras após o ensaio.

Figura 28 – Execução do ensaio de abrasão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a cada experimento em conjunto com sua análise e interpretação, de modo a auxiliar as conclusões da pesquisa, apresentadas no capítulo final deste trabalho. Cabe ressaltar que todos os dados exibidos nos itens subsequentes foram tratados de forma a eliminar valores espúrios. A detecção dos dados espúrios foi feita pela simples análise dos dados obtidos nos experimentos, ou seja, dados díspares, muito grandes ou muito pequenos em relação aos demais, foram desconsiderados.

### 5.1 ESTRUTURA DE POROS

#### 5.1.1 Absortividade

A Figura 29 apresenta os valores médios de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo para os diferentes concretos e compósitos, conforme descrito no item 4.4.1.1. As retas de absorção de água acumulada foram ajustadas por meio de regressão linear, no qual as equações obtidas descrevem as ações capilares nas fases de absorção e saturação. Com base nos gráficos, foram calculados os valores médios da taxa de absorção e resistência capilar, apresentados na Tabela 18. Os dados individuais encontram-se nos Apêndices A e B.

Anteriormente às análises, é importante frisar, de modo a facilitar a compreensão dos resultados, que a taxa de absorção ( $\text{g/cm}^2\text{horas}^{1/2}$ ) está relacionada à capacidade de absorver água no tempo, ou seja, quanto maior a taxa de absorção, maior quantidade de água foi absorvida, indicando, a grande interconexão dos poros. Já a resistência capilar ( $\text{horas/m}^2$ ), fornece um indicativo do diâmetro dos poros do material, isto é, quanto mais finos os poros capilares, mais altas são as forças capilares sobre a água, sendo assim, mais baixa é a resistência capilar. Para simplificar, compreende-se que a resistência capilar está ligada à quantidade de tempo que o corpo de prova levou para atingir a fase de saturação. Uma vez que quanto mais finos são os poros, mais rápida é a penetração e ascensão de água, pode-se afirmar, assim, que resistências capilares altas indicam poros grossos e/ou grande quantidade de poros, já que demoraram mais tempo para serem totalmente atingidos, ou, até mesmo, poros capilares mais finos, porém com grande tortuosidade, o que também conduz a uma maior quantidade de tempo para serem percorridos. Este contexto auxilia, portanto, as análises dos dados apresentados na Tabela 18, descritas na sequência.

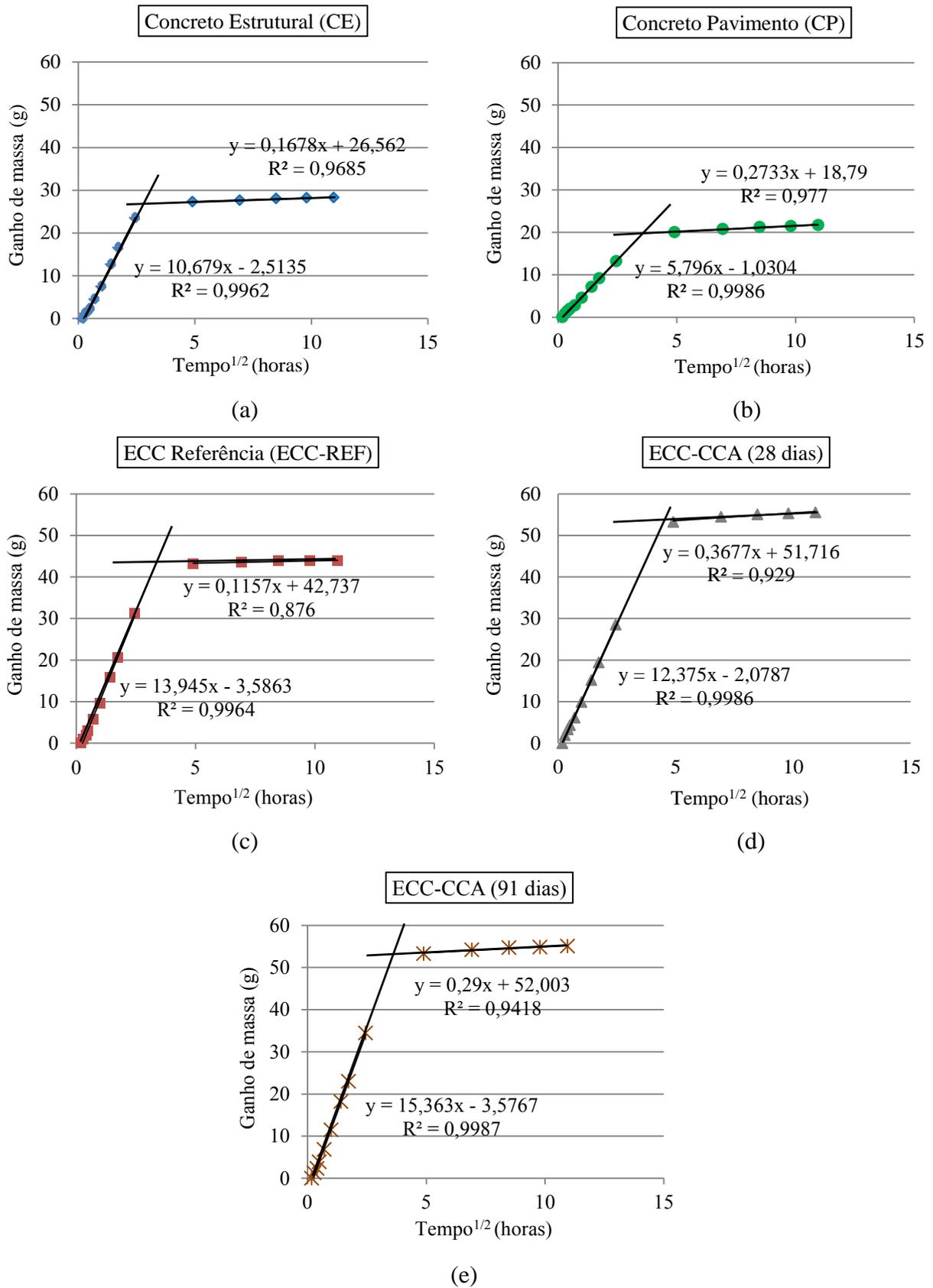


Figura 29 – Valores médios de ganho de massa em função do tempo – ensaio de absorvidade.

Tabela 18 – Resultados da taxa de absorção média ( $\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$ ) e resistência capilar média ( $\text{h}/\text{m}^2$ ).

| <i>Material</i> | <i>Taxa de absorção</i> | <i>SD</i> | <i>CV (%)</i> | <i>Resistência capilar</i> | <i>SD</i> | <i>CV (%)</i> |
|-----------------|-------------------------|-----------|---------------|----------------------------|-----------|---------------|
| CE              | 12,05                   | 0,82      | 6,84          | 4613                       | 150       | 3,25          |
| CP              | 7,41                    | 0,49      | 6,57          | 6127                       | 57        | 0,93          |
| ECC-REF         | 17,76                   | 0,35      | 1,98          | 5361                       | 140       | 2,62          |
| ECC-CCA (28d)   | 15,76                   | 1,02      | 6,48          | 7192                       | 485       | 6,74          |
| ECC-CCA (91d)   | 17,46                   | 0,12      | 0,71          | 6519                       | 100       | 1,53          |

Comparando-se, inicialmente, apenas os compósitos, nota-se que o efeito da substituição do cimento por 30% de CCA produziu, aos 28 dias, uma diminuição de 11% na taxa de absorção média e um aumento de 34% na resistência capilar média, indicando, provavelmente, uma alteração na tortuosidade dos caminhos capilares. Todavia, aos 91 dias, houve um aumento de cerca de 10% na taxa de absorção e uma redução de 9% na resistência capilar, quando comparado aos 28 dias, o que indicaria certo refinamento e diminuição da quantidade de poros, pois absorveu água mais rapidamente e reduziu a quantidade de tempo para atingir a saturação. Este fenômeno é provocado pelo enchimento dos grandes vazios capilares pela pozolana, através da formação dos produtos secundários de hidratação (C-S-H), tornado a estrutura de poros do material mais refinada (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Entretanto, mesmo com este indicativo em relação às médias, é necessário analisar se, de fato, há influência da idade (tempo de cura) na taxa de absorção e resistência capilar. Para tanto, foi realizada a análise de variância (ANOVA) de fator único, conforme mostra a Tabela 19 e Tabela 20. Cabe lembrar que para que as médias sejam consideradas iguais, é necessário que o valor de F seja menor que o  $F_{\text{crítico}}$ . As tabelas, além de compararem o efeito da idade no compósito com cinza de casca de arroz, mostram o efeito da incorporação da cinza nos mesmos, isto é, se a adição de cinza de casca de arroz altera, com efeito, a estrutura de poros.

Tabela 19 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à taxa de absorção.

| <i>Fator</i>               | <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Efeito da idade no ECC-CCA | Entre grupos             | 5,420561  | 1         | 5,420561  | 7,732311 | 0,031967       | 5,987378         |
|                            | Dentro dos grupos        | 4,206164  | 6         | 0,701027  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 9,626725  | 7         |           |          |                |                  |
| Efeito da cinza no ECC     | Entre grupos             | 11,11679  | 2         | 5,558396  | 11,82278 | 0,002319       | 4,102821         |
|                            | Dentro dos grupos        | 4,701428  | 10        | 0,470143  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 15,81822  | 12        |           |          |                |                  |

Onde: *SQ* = soma quadrada; *gl* = graus de liberdade; *MQ* = média quadrada.

Tabela 20 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à resistência capilar.

| <i>Fator</i>               | <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Efeito da idade no ECC-CCA | Entre grupos             | 849570,5  | 1         | 849570,5  | 5,31482  | 0,060651       | 5,987378         |
|                            | Dentro dos grupos        | 959096,1  | 6         | 159849,3  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 1808667   | 7         |           |          |                |                  |
| Efeito da cinza no ECC     | Entre grupos             | 8514693   | 2         | 4257347   | 41,02087 | 1,51E-05       | 4,102821         |
|                            | Dentro dos grupos        | 1037849   | 10        | 103784,9  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 9552542   | 12        |           |          |                |                  |

Onde: *SQ* = soma quadrada; *gl* = graus de liberdade; *MQ* = média quadrada.

Ao observar a Tabela 19 e 20, em relação ao efeito da idade no ECC-CCA, há uma contradição, uma vez que, para a taxa de absorção, há influência da idade ( $F > F_{crítico}$ ) e, para a resistência capilar, a idade não é um parâmetro influente ( $F < F_{crítico}$ ). Com base nas demais análises de variância apresentadas na sequência, para os demais ensaios de caracterização da estrutura de poros, pode-se considerar, apesar do resultado obtido para a taxa de absorção, que não há influência da idade do compósito com cinza de casca de arroz no presente experimento. O fato de o valor de *F* ser ligeiramente maior que o valor de *F*<sub>crítico</sub> para a taxa de absorção, pode ser atribuído a algum ruído experimental, levando-se em consideração que os corpos de prova não foram obtidos da mesma betonada. Cabe ressaltar, também, que o ECC-CCA (28 dias) apresentou desvios-padrões mais consideráveis, tanto para o resultado de taxa de absorção quanto para a resistência capilar.

Em relação ao efeito da cinza no compósito, evidencia-se que há influência da presença da mesma na taxa de absorção e, também, na resistência capilar, já que o *F* é consideravelmente maior que o *F*<sub>crítico</sub>, em ambos os casos, demonstrando estatisticamente a mudança na estrutura de poros. Acredita-se que a cinza de casca de arroz tenha alterado a tortuosidade dos caminhos gerados pelos capilares, sem redução, todavia, da quantidade de poros totais (macroporos, poros capilares e microporos), uma vez que o ganho de massa dos compósitos com cinza, observado na Figura 29.c, foi maior do que o obtido para o compósito de referência. Esta conclusão pôde ser obtida levando-se em consideração que não há influência da idade do ECC-CCA neste experimento, e analisando, de forma geral, as reduções nas taxas de absorção e os aumentos nas resistências capilares em relação ao compósito de referência.

Comparando-se, pois, os compósitos aos concretos convencionais, sob a taxa de absorção, observa-se que os concretos possuem valores inferiores, de aproximadamente 32% e 58% em relação ao ECC-REF, para os concretos estrutural (CE) e pavimento (CP), respectivamente.

Em relação à resistência capilar, o concreto estrutural apresentou o valor mais baixo, já o concreto para pavimento, o terceiro valor mais alto, inferior apenas aos compósitos com cinza em ambas as idades. Desta forma, admite-se que o concreto estrutural apresenta maior volume de poros de grandes conexões quando comparado ao concreto para pavimento, o qual possui maior compacidade pela constituição de uma granulometria contínua. Este fato justifica sua baixa taxa de absorção e elevada resistência capilar.

Em suma, considerando as menores taxas de absorção juntamente com os menores ganhos de massa obtidos para os concretos, acredita-se que os mesmos possuem uma quantidade menor de poros quando comparados aos compósitos. Tal fato pode ser justificado pela presença dos agregados graúdos, uma vez que são inertes e ocupam grande parte do material, e, ainda, possivelmente, pelo menor volume de zonas interfaciais da matriz com o agregado graúdo, do que da fibra com a matriz.

### 5.1.2 Absorção e índice de vazios

A Figura 30 mostra um histograma com os valores médios de absorção e índice de vazios, determinados conforme o item 4.4.1.2. Os dados individuais encontram-se no Apêndice C. Cabe ressaltar que, neste experimento, a absorção é baseada no processo em que a água é transportada e tende a ocupar os poros totais da amostra. Desta forma, a penetração de água é forçada a fluir em todas as direções, e não apenas por ascensão capilar, como no ensaio anterior, fornecendo, assim, uma ideia da quantidade total de poros existente no corpo de prova.

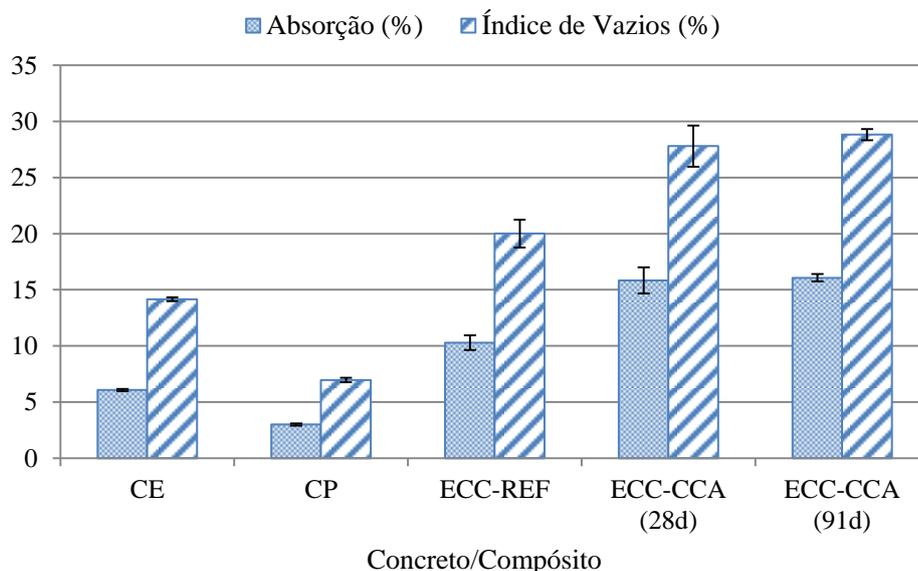


Figura 30 – Valores médios de absorção de água e índice de vazios.

Observando-se a Figura 30, nota-se que o ECC-CCA, aos 28 dias, apresentou os maiores valores de absorção de água e índice de vazios, cerca de, respectivamente, 1,5 e 1,4 vezes maior que o ECC-REF. Os concretos, estrutural (CE) e para pavimento (CP), apresentaram os menores valores de absorção, aproximadamente 1,7 e 3,4 vezes menores que o ECC-REF, e 1,4 e 2,9 vezes menor para o índice de vazios, quando comparados, também, ao compósito de referência (ECC-REF). Tais resultados encontram-se em conformidade com os obtidos para o ensaio de absorvidade, acreditando-se que a incorporação de cinza de casca de arroz tenha alterado apenas a tortuosidade dos poros capilares, porém com aumento do número total de poros.

Ao analisar o gráfico, é possível notar, visualmente, a diferença entre o ECC-REF e o ECC-CCA para ambas as idades, e a semelhança nos resultados entre as idades dos compósitos com cinza. Para confirmar esta hipótese, foram realizadas, da mesma forma que o item anterior, a análise de variância (ANOVA) de fator único, correlacionando a influência do fator incorporação da cinza no compósito, e do fator idade (tempo de cura) do ECC-CCA, nos resultados de absorção e índice de vazios, conforme as Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à absorção.

| <i>Fator</i>               | <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Efeito da idade no ECC-CCA | Entre grupos             | 0,086529  | 1         | 0,086529  | 0,119652 | 0,746839       | 7,708647         |
|                            | Dentro dos grupos        | 2,892704  | 4         | 0,723176  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 2,979234  | 5         |           |          |                |                  |
| Efeito da cinza no ECC     | Entre grupos             | 64,10562  | 2         | 32,05281  | 51,21969 | 0,000169       | 5,143253         |
|                            | Dentro dos grupos        | 3,754744  | 6         | 0,625791  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 67,86036  | 8         |           |          |                |                  |

Onde: *SQ* = soma quadrada; *gl* = graus de liberdade; *MQ* = média quadrada.

Tabela 22 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto ao índice de vazios.

| <i>Fator</i>               | <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Efeito da idade no ECC-CCA | Entre grupos             | 1,555891  | 1         | 1,555891  | 0,861923 | 0,405752       | 7,708647         |
|                            | Dentro dos grupos        | 7,220561  | 4         | 1,80514   |          |                |                  |
|                            | Total                    | 8,776452  | 5         |           |          |                |                  |
| Efeito da cinza no ECC     | Entre grupos             | 139,4287  | 2         | 69,71436  | 40,663   | 0,000324       | 5,143253         |
|                            | Dentro dos grupos        | 10,28665  | 6         | 1,714442  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 149,7154  | 8         |           |          |                |                  |

Onde: *SQ* = soma quadrada; *gl* = graus de liberdade; *MQ* = média quadrada.

Observando-se as Tabelas 21 e 22, evidencia-se, estatisticamente, que não há influência da idade nos compósitos com cinza, tanto para a absorção, quanto para o índice de vazios, já que os valores de  $F$  são consideravelmente menores que os valores de  $F_{crítico}$ . Por outro lado, há evidências da influência da incorporação da cinza nos compósitos, visto que os valores de  $F$  são substancialmente maiores que os valores de  $F_{crítico}$ , em ambos os casos.

### 5.1.3 Absorção de água por capilaridade

A Figura 31 apresenta o gráfico da absorção média de água por capilaridade em função do tempo, para os concretos e compósitos estudados, conforme prescrito no item 4.4.1.3. Os dados individuais encontram-se no Apêndice D. Neste ensaio, a absorção de água também ocorre através dos poros capilares, porém não sendo necessária a vedação lateral dos corpos de prova, já que estes permanecem em contato com uma lamina d'água de apenas 5 mm.

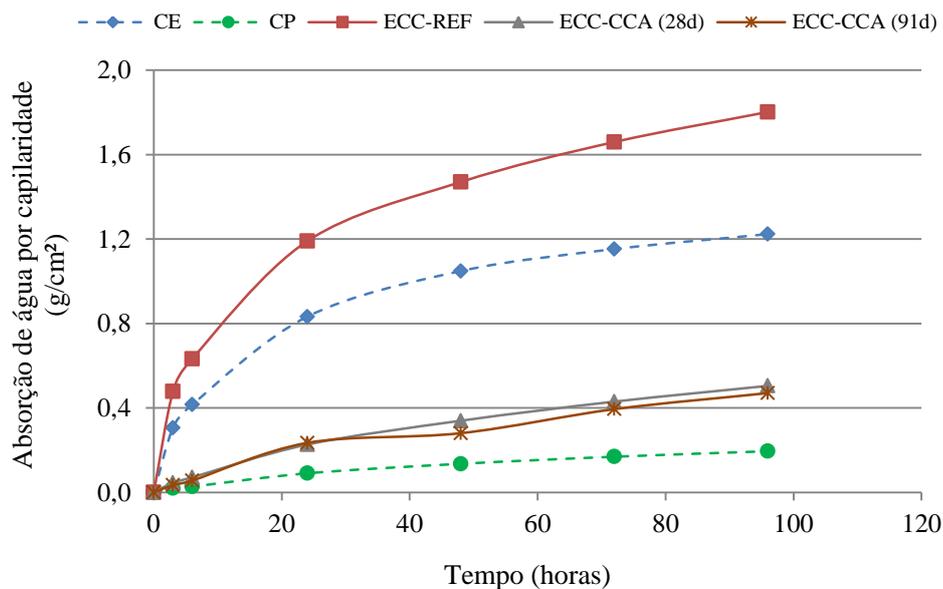


Figura 31 – Valores médios de absorção de água por capilaridade.

Ao considerar, inicialmente, apenas os compósitos, nota-se uma redução substancial na absorção de água por capilaridade, de cerca de 70%, em ambos ECC-CCA (28 e 91 dias), quando comparados ao compósito de referência (ECC-REF). O concreto para pavimento (CP) permanece com os menores valores de absorção, estando, assim, em conformidade com os resultados obtidos nos itens anteriores. O concreto estrutural (CE) também se encontra de acordo com os resultados anteriores, já que apresentava valores de taxa de absorção inferiores aos compósitos. O comportamento atípico dos compósitos com cinza, neste ensaio, reforça a ideia baseada na alteração da tortuosidade dos caminhos capilares gerada pela presença da

pozolana e, também, de uma provável desconexão entre os poros. É importante lembrar que neste ensaio, os corpos de prova não foram serrados, portanto o fator “efeito parede” influencia, de certa forma, os resultados do experimento.

A análise de variância (ANOVA), também foi realizada para este experimento, visando confirmar a diferença entre o compósito de referência (ECC-REF) e os compósitos com cinza (ECC-CCA) e, também a influência da idade nos ECC-CCA. Para tal verificação, em relação a cada variável para todos os tempos de medição do ensaio, foi realizada ANOVA fator duplo com repetição. A Tabela 23 mostra a análise obtida.

Tabela 23 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à absorção de água por capilaridade.

| <i>Fator</i>               | <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Efeito da idade no ECC-CCA | Interações               | 0,004877  | 6         | 0,000813  | 0,133534 | 0,990813       | 2,445259         |
|                            | Dentro                   | 0,170452  | 28        | 0,006088  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 0,175329  | 34        |           |          |                |                  |
| Efeito da cinza no ECC     | Interações               | 2,892382  | 12        | 0,241032  | 39,00492 | 7,39E-19       | 1,991013         |
|                            | Dentro                   | 0,25954   | 42        | 0,00618   |          |                |                  |
|                            | Total                    | 3,151922  | 54        |           |          |                |                  |

Onde: *SQ* = soma quadrada; *gl* = graus de liberdade; *MQ* = média quadrada.

Nesta análise, são realizadas variações de interação entre amostras e entre os tempos de medições. Logo, ao observar, primeiramente, o efeito da idade nos compósitos com cinza, confirma-se a hipótese de que a absorção de água por capilaridade, com o tempo, pode ser considerada a mesma para 28 e 91 dias ( $F < F_{crítico}$ ). Na sequência, analisando o efeito da cinza no compósito, o fato de o valor de *F* ser substancialmente maior que o valor de *F*<sub>crítico</sub>, verifica-se que a absorção de água por capilaridade muda para os diferentes compósitos.

Subsequente ao ensaio de absorção de água por capilaridade, os corpos de prova são rompidos por compressão diametral, permitindo a medição das alturas de penetração de água nos mesmos. A Figura 32 apresenta a média obtida para as alturas máximas de penetração, no qual é possível correlacionar o diâmetro dos poros e a quantidade de água absorvida, obtidas tanto pelo presente ensaio, quanto pelo ensaio absorvidade (item 5.1.1). É importante frisar, primeiramente, que as forças capilares aumentam com a diminuição do diâmetro dos poros. Assim, poros maiores apresentam uma menor altura de sucção e maiores volumes absorvidos. Por sua vez, materiais com grandes quantidades de poros mais finos, podem apresentar elevadas alturas de penetração aliadas a uma grande quantidade de água absorvida.

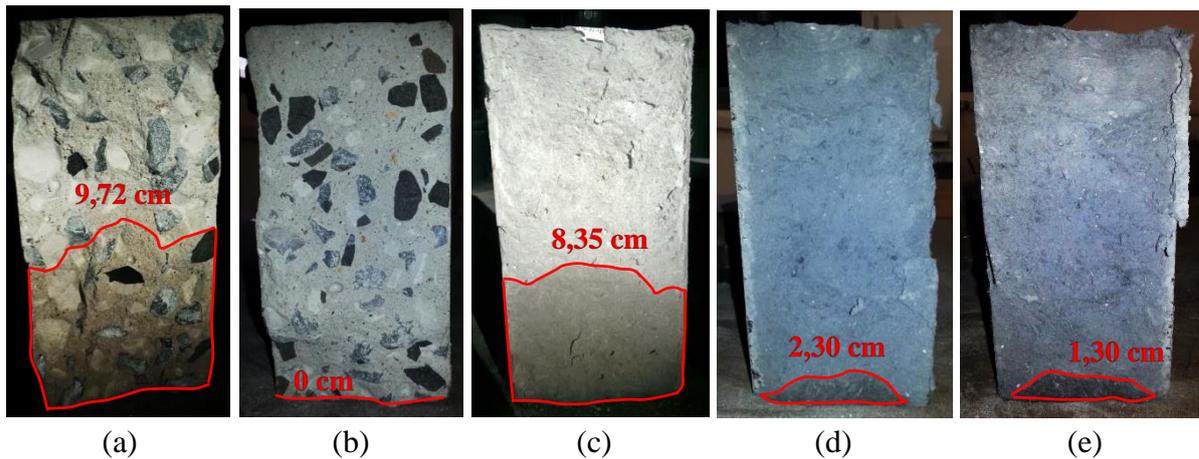


Figura 32 – Alturas totais médias de penetração de água: CE (a), CP (b), ECC-REF (c), ECC-CCA-28dias (d) e ECC-CCA-91dias (e).

Com base no contexto anterior, tendo como base o ECC-REF, é possível notar que, além de possuir grande quantidade de poros no seu interior, já que apresentou a maior curva de absorção de água por capilaridade e, também, a maior taxa de absorção, tais poros aparentam ser finos e conectados, permitindo uma maior altura de ascensão de água para seu interior, o que também condiz com a baixa resistência capilar obtida. Acredita-se, portanto, que o ECC-REF possui grande quantidade de poros capilares de pequeno diâmetro. Da mesma forma, é possível admitir, através dos resultados, que o concreto estrutural (CE) também possui grande quantidade de poros finos, ainda menores que o ECC-REF. Wang *et al.* (2001) ressaltam que a adição de fibras aumenta, de fato, a quantidade de poros de maiores dimensões em comparação a concretos convencionais, fato que reduz a pressão capilar. Segundos os mesmo autores, estes poros encontram-se na zona interfacial entre as fibras e a matriz de cimento.

O concreto para pavimento (CP) continua, ainda, em conformidade com os demais ensaios. Lembrando que, assim como no presente ensaio de absorção de água por capilaridade, sua taxa de absorção (ensaio de absorvidade) foi a mais baixa, assim como sua resistência capilar foi uma das mais altas, inferior apenas aos ECC-CCA (28 e 91 dias). Os compósitos com cinza, em ambas as idades, também continuam, de certa forma, de acordo com os resultados anteriores. Apesar da absorção de água por capilaridade ser inferior ao concreto estrutural (CE), diferentemente da taxa de absorção no ensaio de absorvidade, o experimento confirma, juntamente com a análise da Figura 32.d e 32.e, a alteração na estrutura de poros gerada pela presença da cinza, como mencionado anteriormente.

### 5.1.4 Absorção de água pelo método do cachimbo

O ensaio de absorção de água pelo método do cachimbo, conforme descrito no item 4.4.1.4, difere dos demais ensaios, pois a água é induzida a penetrar na face do corpo de prova, considerando a nata superficial, ou seja, o “efeito parede” gerado pela moldagem do material. A Figura 33 apresenta os resultados das alturas médias de coluna d’água no tempo. Os dados individuais encontram-se no Apêndice E.

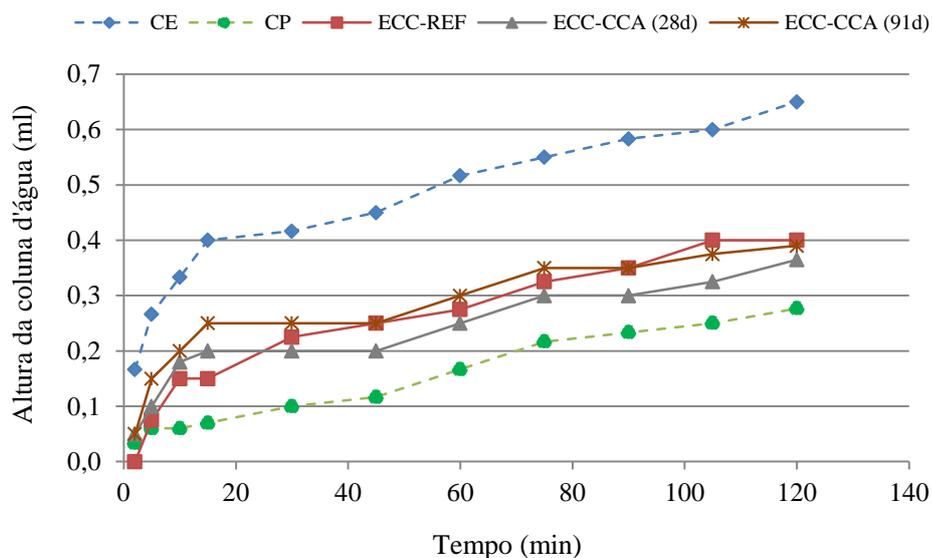


Figura 33 – Alturas médias de coluna de água – ensaio do cachimbo.

Os ensaios de absorção de água pelo método do cachimbo contradizem a tendência dos resultados anteriores, pois, com o tempo, a altura de penetração de água é menor para o ECC-REF em relação ao concreto estrutural (CE). Acredita-se que a divergência entre os resultados de absorção de água ocorra devido à metodologia de ensaio empregada, uma vez que o ensaio do cachimbo, além de considerar o efeito “parede” na penetração de água do material, os corpos de prova são mantido em cura à temperatura do ambiente (aproximadamente  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e U.R. variável), e não seco em estufa como as demais amostras referentes aos outros ensaios. Sendo assim, acredita-se a umidade absorvida inicialmente pelos materiais neste período, possa ter influenciado nos resultados. Pode-se levar em conta, no entanto, que este ensaio simula uma situação mais próxima da usual, já que o concreto/compósito dificilmente estará com ausência de qualquer umidade presente no seu interior. Os outros ensaios, entretanto, são mais a favor da segurança, já que estudam o comportamento interior do material e em situações mais críticas, podendo-se analisar, de forma mais eficiente, a estrutura de poros do material, que é objetivo principal destas análises.

A análise de variância (ANOVA), também foi realizada para este experimento, no intuito de verificar a influência da cinza no compósito e da idade (28 e 91 dias) nos ECC-CCA. Nota-se, ao observar a Figura 33, que as curvas médias de altura da coluna d'água encontram-se próximas umas das outras para este ensaio. Para tal verificação, em relação a cada variável para todos os tempos de medição do ensaio, foi realizada ANOVA fator duplo com repetição. A Tabela 24 mostra a análise obtida.

Tabela 24 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à absorção de água por capilaridade.

| <i>Fator</i>               | <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Efeito da idade no ECC-CCA | Interações               | 0,023961  | 20        | 0,001198  | 0,580117 | 0,899111       | 1,897669         |
|                            | Dentro                   | 0,06815   | 33        | 0,002065  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 0,092111  | 53        |           |          |                |                  |
| Efeito da cinza no ECC     | Interações               | 0,003023  | 10        | 0,000302  | 0,154114 | 0,99793        | 2,296696         |
|                            | Dentro                   | 0,04315   | 22        | 0,001961  |          |                |                  |
|                            | Total                    | 0,046173  | 32        |           |          |                |                  |

Onde: *SQ* = soma quadrada; *gl* = graus de liberdade; *MQ* = média quadrada.

Neste caso, nota-se que, em ambas as situações, o valor de *F* é inferior ao valor de *F* crítico. Desta forma, conclui-se que a incorporação da cinza, bem como a idade dos compósitos com cinza, não são fatores influentes na altura de penetração de água pelo método do cachimbo. Tais fatos podem ser justificados pela técnica de ensaio aplicada, pois, além do “efeito parede”, a quantidade de umidade já absorvida pelo material pode influenciar nos resultados, prejudicando a precisão e eficiência. Apesar disso, o ensaio confere uma noção da permeabilidade superficial dos materiais, que deve, de todo modo, ser considerada.

### 5.1.5 Síntese dos resultados

Os ensaios para análise da estrutura de poros exibem tendências de comportamentos, que auxiliam na interpretação em conjunto dos resultados. Entretanto, é necessário levar em consideração a metodologia distinta de cada experimento, o que pode gerar variações e confusões nas análises correlacionadas. Assim, é importante frisar pontos específicos em comum a cada ensaio, de modo a facilitar o entendimento.

A variação do tempo de cura dos compósitos com cinza de casca de arroz, por exemplo, mostra, para todos os ensaios realizados, não ser um fator influente, o que induz a crer que a cinza utilizada neste trabalho não necessita de idades mais avançadas para atingir o seu

potencial, devido, possivelmente, ao tempo de moagem de 8 horas. Pressupõe-se, portanto, que o tempo de cura de 28 dias é suficiente para a formação de quase todos os produtos de hidratação, justificando a não alteração da estrutura de poros que ocorre pela precipitação de tais produtos com o avanço da idade.

Outro ponto fundamental em comum às análises é o fato de os compósitos com cinza (ECC-CCA) apresentarem grande quantidade de poros (observados através dos ganhos de massa, absorção e índice de vazios), porém com alterações da conectividade e tortuosidade (observadas pela redução da taxa de absorção e absorção de água por capilaridade, aumento da resistência capilar e diminuição da altura de penetração de água) quando comparadas ao ECC-REF. Tais fatos foram confirmados pelas imagens realizadas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 34 evidencia o tamanho e a conexão de um poro capilar no compósito de referência (a), comparado ao compósito com cinza (b), a uma magnificação de 1000x.

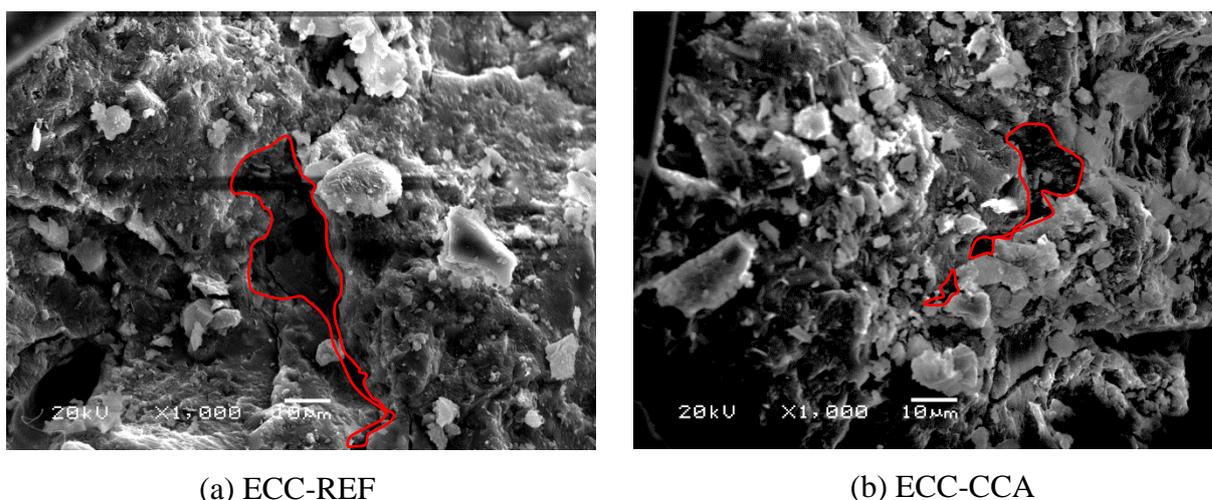


Figura 34 – Comparação microscópica de um poro capilar presente nos compósitos: ECC-REF (a) e ECC-CCA (b).

As imagens feitas pelo MEV serviram de subsídio para confirmar os comportamentos presumidos apenas para os compósitos. Logo, não foram realizadas imagens para analisar os poros dos concretos, lembrando que um dos objetivos principais do trabalho, é investigar a estrutura de poros dos compósitos, como materiais inovadores, e compará-las entre si, sendo os resultados obtidos para os concretos considerados como um patamar de referência de durabilidade. Os pontos até então sintetizados, auxiliam na compreensão geral dos resultados, de forma a evidenciar as alterações internas do material, gerada pela presença da cinza de casca de arroz. Demais considerações são tratadas no capítulo de conclusão do trabalho.

## 5.2 AÇÃO DE CLORETOS

### 5.2.1 Penetração de cloretos

O ensaio de penetração acelerada de íons cloretos consiste em um teste de migração elétrica em estado estacionário, porém as medições são feitas antes que o mesmo seja atingido, durando um período total de 6 horas. A Figura 35 apresenta o gráfico das correntes médias em função do tempo, obtidas através da diferença de potencial aplicada nos corpos de prova, conforme descrito no item 4.4.2.1. Os dados individuais encontram-se no Apêndice F.

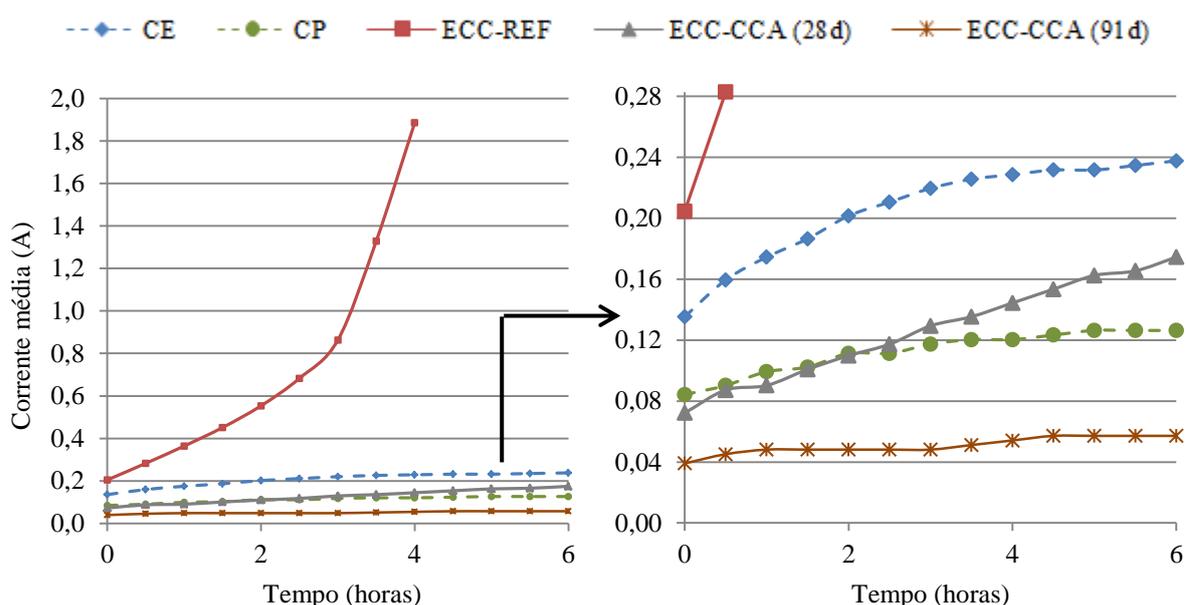


Figura 35 – Correntes médias (A) obtidas no ensaio de penetração de íons cloretos.

A potência da fonte utilizada no ensaio permite que a corrente máxima atinja 3,0 A. Para as amostras de ECC-REF, quando o ensaio atingiu 4 horas de execução, o mesmo teve de ser cancelado, pois além da corrente ter ultrapassado 2,0 A, houve o derretimento do silicone usado na selagem das amostras, já que a temperatura da solução de cloreto de sódio (NaCl) ultrapassou 100°C. Assim, o gráfico apresentado na Figura 33, à direita, mostra uma aproximação das demais correntes médias medidas, de modo a facilitar a visualização para os outros traços estudados.

As cargas  $Q$ , em Coulombs, calculadas a partir das correntes médias (Equação 2), fornecem através de uma tabela proposta pela ASTM C1202 (2012), indicações qualitativas quanto ao risco de penetração de íons cloretos. A Tabela 25 mostra, portanto, os valores médios

calculados e o risco de penetração correspondente. A Figura 36 apresenta as cargas médias em um histograma, permitindo uma melhor comparação entre os resultados.

Tabela 25 – Cargas Q médias e avaliação qualitativa da penetrabilidade de íons cloreto.

| <i>Material</i> | <i>Q média (Coulombs)</i> | <i>SD</i> | <i>CV (%)</i> | <i>Penetrabilidade de íons cloreto</i> |
|-----------------|---------------------------|-----------|---------------|--|
| CE              | 4484                      | 473       | 10,55         | Alto                                   |
| CP              | 2437                      | 307       | 12,58         | Moderado                               |
| ECC-REF         | 11729*                    | 734       | 6,26          | Alto                                   |
| ECC-CCA (28d)   | 2735                      | 258       | 9,44          | Moderado                               |
| ECC-CCA (91d)   | 1099                      | 132       | 12,04         | Baixo                                  |

\*Valor correspondente às 4 horas de duração do ensaio.

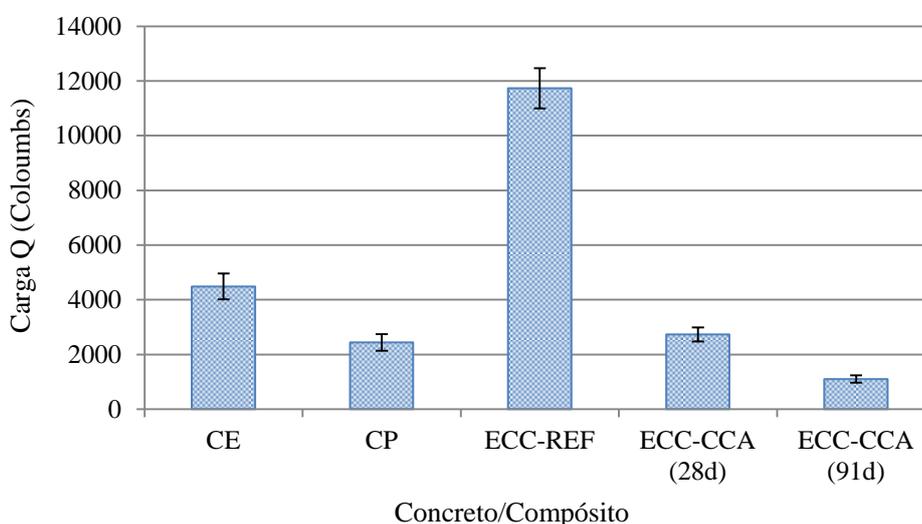


Figura 36 – Cargas médias (Coulombs) obtidas no ensaio de penetração de cloretos.

Anteriormente às análises, cabe frisar que este ensaio é amplamente criticado no meio acadêmico (ANDRADE, 1993; GEIKER *et al.*, 1995; SHI *et al.*, 1998; entre outros), uma vez que, como os íons são carregados eletricamente, durante o processo de difusão há movimentação de outros íons para que a neutralidade elétrica seja mantida. Por isso, podem ocorrer trocas iônicas entre a solução de poros e a superfície do concreto. Andrade (1993) confirma que a corrente total conferida representa o fluxo de todos os íons presentes na solução de poros ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ). Além disso, acredita-se que as fibras podem criar caminhos fáceis para a passagem da carga elétrica através das amostras, influenciando os resultados.

Neste contexto, admite-se que os valores exorbitantes obtidos para o ECC-REF possam ser explicados, primeiramente, pela grande quantidade de poros conectados existente no material (conforme apresenta os resultados obtidos no item 5.1), o que facilita o transporte de íons

cloreto, e, além disso, pelo seu elevado consumo de cimento (mais de 1000 kg/m<sup>3</sup>) em comparação aos demais, o que gera a dissociação de grandes quantidades de íons devido às reações de hidratação. Sendo assim, é possível que tais íons tenham sido transportados juntamente com os íons cloretos atuantes no experimento, produzindo elevadas correntes elétricas.

Já o fato de a incorporação de cinza ter reduzido substancialmente os valores de corrente e carga elétrica, pode ser explicado, também, pela alteração da estrutura de poros, já que a possível descontinuidade e tortuosidade da rede de poros conferida pela presença da cinza acabam dificultando a passagem dos íons cloretos. Entretanto, como a redução da corrente total e da carga elétrica foram substanciais (aproximadamente 76% e 90% do ECC-REF para 28 e 91 dias, respectivamente), outros fatores devem ser considerados, como a diminuição da quantidade de cimento e a provável capacidade de combinação de cloretos do compósito, devido ao teor de alumina reativa presente na pozolana, gerando a formação do sal de Friedel. Cabe ressaltar, que tais fatos são tidos apenas como hipóteses para os resultados, especulados com base na literatura (ver item 3.2), já que não foram realizados ensaios específicos que confirmassem tais possibilidades. Para verificação da formação do sal de Friedel, por exemplo, seriam necessárias análises de difração de raios-X (DRX).

Outro fator importante a ser levado em conta, é a redução de 67% da corrente total média e de 59% da carga elétrica média entre as idades analisadas. Este fato não pode ser atribuído à modificação da microestrutura, já que as análises ANOVA apresentadas no item 5.1 mostram que idade dos compósitos não é um fator influente nos resultados. Segundo Shi *et al.* (1998), além das alterações na microestrutura da pasta, outro fator que influencia diretamente o valor total da carga passante, modificando a condutividade elétrica do concreto, é a alteração na composição química da solução aquosa dos poros provocada pelas reações pozolânicas. Acredita-se, assim, que tais reações, apesar de não terem afetado efetivamente a estrutura física dos poros do compósito de 28 para 91 dias, tenham alterado quimicamente a solução dos poros de modo que, em idades mais avançadas, a condutividade elétrica é reduzida. We *et al.* (2000) confirmam que a diminuição da condutividade da solução dos poros (devido à diminuição dos íons OH<sup>-</sup>) gera um aumento da resistência à penetração de íons cloretos quando o grau de hidratação é aumentado.

A Tabela 26 apenas confirma estatisticamente a influência da cinza no compósito e da idade no ECC-CCA, através da análise de variância ANOVA, em que, para ambos os casos, obteve-

se um valor de  $F$  consideravelmente maior que o valor de  $F_{crítico}$ . As análises foram feitas com base nos resultados de carga elétrica.

Tabela 26 – ANOVA da influência da incorporação da cinza no ECC e da idade no ECC-CCA quanto à carga elétrica (ensaio de penetração de íons cloreto).

| <i>Fator</i>               | <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i>  | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|------------------|
| Efeito da idade no ECC-CCA | Entre grupos             | 4011456   | 1         | 4011456   | 95,401674 | 0,0006156      | 7,708647         |
|                            | Dentro dos grupos        | 168192,3  | 4         | 42048,07  |           |                |                  |
|                            | Total                    | 4179649   | 5         |           |           |                |                  |
| Efeito da cinza no ECC     | Entre grupos             | 1,97E+08  | 2         | 98280680  | 472,92631 | 2,505E-07      | 5,143253         |
|                            | Dentro dos grupos        | 1246884   | 6         | 207813,9  |           |                |                  |
|                            | Total                    | 1,98E+08  | 8         |           |           |                |                  |

Onde:  $SQ$  = soma quadrada;  $gl$  = graus de liberdade;  $MQ$  = média quadrada.

Os concretos, por sua vez, apresentaram comportamentos esperados em função dos seus resultados quanto à estrutura de poros no item 5.1, visto que ambos não possuem nenhum material cimentício suplementar na sua composição que pudesse alterar os resultados de corrente e carga elétrica. O concreto para pavimento (CP) apresentou baixas taxas de absorção e alta resistência capilar (inferior apenas ao ECC-CCA), fatos que levaram a obtenção de um risco moderado de penetração de íons cloretos. O concreto estrutural (CE) mostrou, geralmente, os piores resultados, conferindo, conseqüentemente, um alto risco de penetração a cloretos.

É importante lembrar que o ensaio acelerado de penetração de íons cloretos não pode ser utilizado como indicativo de permeabilidade. Segundo Shi (2004), a permeabilidade do concreto depende da sua estrutura de poros, ao passo que a condutividade elétrica ou resistividade é determinada tanto pela estrutura de poros como pela composição química da solução de poros. O transporte de íons cloreto relaciona-se pouco com a química da solução de poros, mas muitos fatores (i.e., composição do cimento, agregados, proporções da mistura, uso de materiais cimentícios suplementares, aditivos, etc.) podem ter efeitos significativos sobre a concentração de íons condutores na solução. Portanto, os parâmetros de condutibilidade ou resistividade não podem ser usados como indicação de permeabilidade. No entanto, servem como um indicador de controle de qualidade quando os concretos têm os mesmos componentes e as mesmas proporções de mistura. Por este motivo, os concretos não são comparados diretamente aos compósitos, servindo apenas como um patamar de referência, já que o propósito do estudo dos compósitos é a substituição destes materiais, seja no reforço ou construção de novas estruturas e pavimentação.

### 5.2.2 Difusão de cloretos

O ensaio de difusão de cloretos, diferentemente do ensaio de penetração acelerada, consiste em um teste no estado não-estacionário, no qual as amostras são imersas em solução de cloreto de sódio (NaCl) durante um período de 90 dias, conforme prescrito no item 4.4.2.2. Neste experimento não há aplicação de gradientes de potencial elétrico. Após o período de teste, é possível obter um perfil de cloretos até a profundidade atingida no fluxo unidirecional e, também, o coeficiente de difusão aparente ( $D_{app}$ ), que leva em consideração a ligação de cloretos (cloretos combinados), podendo ser utilizado para previsão do período de início da corrosão.

Após o término do tempo de exposição, os corpos de provas foram secos e o pó referente a cada *layer* foi retirado com o auxílio de uma furadeira. A profundidade dos *layers* é determinada de acordo com a norma CEN/TS 12390-11 (2010), que leva em consideração a presença de algum material cimentício suplementar e a relação água/cimento ou água/aglomerante do material. Para os compósitos, adotou-se os *layers* respectivos a uma relação a/agl de 0,35 e para os concretos (estrutural e pavimento), adotou-se os *layers* para uma relação de 0,70<sup>6</sup> e 0,40, respectivamente. A Tabela 27 mostra os intervalos de profundidades dos *layers* utilizados, em milímetros.

Tabela 27 – Intervalos de profundidade utilizados (em milímetros) – Ensaio de difusão de cloretos.

| <i>Material</i>             | <i>Compósitos</i> | <i>Concreto Estrutural</i> | <i>Concreto Pavimento</i> |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| <b>Relação a/c ou a/agl</b> | <b>0,35</b>       | <b>0,70</b>                | <b>0,40</b>               |
| <i>Layer 1</i>              | 0~1               | 0~1                        | 0~1                       |
| <i>Layer 2</i>              | 1~2               | 1~3                        | 1~2                       |
| <i>Layer 3</i>              | 2~3               | 3~6                        | 2~3                       |
| <i>Layer 4</i>              | 3~4               | 6~10                       | 3~5                       |
| <i>Layer 5</i>              | 4~6               | 10~15                      | 5~7                       |
| <i>Layer 6</i>              | 6~8               | 15~20                      | 7~9                       |
| <i>Layer 7</i>              | 8~10              | 20~25                      | 9~12                      |
| <i>Layer 8</i>              | 10~12             | 25~30                      | 12~16                     |

As análises químicas das concentrações de cloretos, calculadas em porcentagem de massa de concreto, de acordo com a EN 14629 (2007), apresentaram valores arbitrários, isto é, não houve a tendência lógica de diminuição da concentração com o aumento da profundidade do *layer*. Acredita-se, portanto, na ocorrência de um erro experimental, já que o equipamento

<sup>6</sup> A relação água/cimento do concreto estrutural (CE) é de 0,65. A norma, entretanto, propõe *layers* apenas para as relações de 0,60 e 0,70. Optou-se, de modo a facilitar as análises, em não intermediar as relações e adotar os intervalos propostos para a relação de 0,70.

utilizado para retirada dos pós não era adequado, pois impedia que a extração fosse feita de forma precisa e unidirecional. Assim, pressupõe-se que as profundidades estabelecidas não foram mantidas, pois além do intervalo ser muito pequeno, é possível que tenha ocorrido mistura ou incorporação de pós de um determinado *layer* em outro. Dessa forma, o perfil de cloretos não pôde ser montado.

Visando o aproveitamento dos resultados, mesmo que empiricamente, o coeficiente de difusão aparente ( $D_{app}$ ) de cada amostra foi calculado com base na concentração inicial ( $C_i$ ), intrínseca do material, e concentração final ( $C_s$ ), adotada como o valor da solução de cloretos de 3%. Desta forma, obtêm-se um coeficiente de difusão “crítico”, chamado de  $D_{app}'$ , considerando uma situação extrema, lembrando que não é possível que algum dos *layers* atinja valor superior à solução. Já as profundidades ( $x$ ) de penetração de cloretos foram determinadas a partir da aspersão de nitrato de prata (solução 0,1N  $AgNO_3$ ), no qual é possível obter a profundidade média real em que os cloretos penetraram na amostra. Para tanto, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral e o nitrato de prata dispersado em cada metade. Assim, onde há presença de cloretos, o nitrato precipita na amostra deixando-a branca, enquanto que na zona não penetrada, a amostra torna-se castanha. A Figura 37 mostra as alturas de penetração de cloretos na parte superior e inferior dos corpos de prova. Para o cálculo dos coeficientes adotou-se a média entre os dois valores.

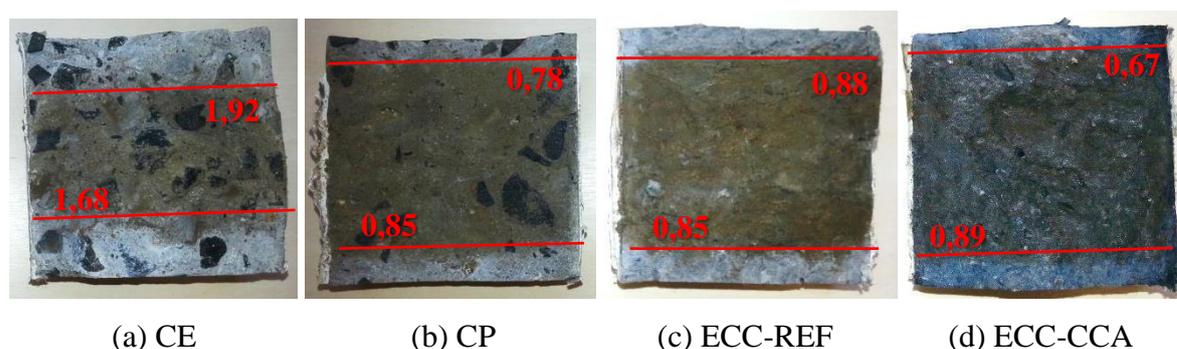


Figura 37 – Determinação das profundidades de penetração de cloretos, em centímetros, pelo método de aspersão de nitrato de prata.

Tendo-se as concentrações e as médias das alturas de penetração (superior e inferior), o coeficiente de difusão ( $D_{app}'$ ) foi calculado através da segunda lei de Fick. A Tabela 28 mostra todas as variáveis (concentrações, profundidade e tempo) e os resultados do coeficiente obtido para cada amostra. É importante ressaltar que o experimento foi realizado

em apenas um corpo de prova referente a cada traço, pois, devido à grande morosidade na extração dos *layers*, não foi possível realizar novas repetições.

Tabela 28 – Variáveis (concentrações, profundidade e tempo) e coeficiente de difusão ( $D_{app}$ ’).

| Variável                        | Concreto/Compósito             |                                |                                |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                 | CE                             | CP                             | ECC-REF                        | ECC-CCA                        |
| Ci*                             | 0,0056                         | 0,0058                         | 0,0063                         | 0,0054                         |
| Cs*                             | 0,0300                         | 0,0300                         | 0,0300                         | 0,0300                         |
| x (cm)                          | 1,8                            | 0,94                           | 1,03                           | 0,77                           |
| t (s)                           | 7776000                        | 7776000                        | 7776000                        | 7776000                        |
| $D_{app}$ ’ (m <sup>2</sup> /s) | <b>14,7 x 10<sup>-12</sup></b> | <b>4,07 x 10<sup>-12</sup></b> | <b>5,85 x 10<sup>-12</sup></b> | <b>2,73 x 10<sup>-12</sup></b> |

\*Valores em porcentagem por massa de concreto/compósito.

Ao analisar a Figura 37 e as profundidades “x” na Tabela 29, nota-se que a incorporação da cinza no compósito conferiu uma diminuição de aproximadamente 25% na altura média de penetração de cloretos. Em relação ao coeficiente de difusão, houve uma diminuição de 53%. Tais fatos evidenciam a alteração da tortuosidade e conectividade dos poros capilares, aliado à capacidade de ligação/cominação de cloretos gerada pela presença da cinza de casca de arroz, o que dificultou o processo de difusão.

Comparando-se, por outro lado, o coeficiente de difusão do ECC-REF aos concretos convencionais, evidencia-se uma diminuição de 60% em relação ao CE e um aumento de 43% em relação ao CP. Já o ECC-CCA, obteve uma redução de 81% e 33%, respectivamente. Sabe-se, intuitivamente, que um baixo coeficiente de difusão aparente ( $D_{app}$ ) irá resultar no aumento do tempo para o início da corrosão, porém, a previsão da vida útil vai além do escopo deste trabalho e, portanto, não será abordada.

No trabalho de Sahmaran *et al.* (2007), o ECC (contendo cinza volante e fibra de PVA em sua composição) foi comparado a uma argamassa convencional quanto à difusão de íons cloretos pelo método da AASTHO T259-80. O autor obteve valores de coeficiente de difusão de  $10,58 \times 10^{-12}$  para a argamassa e  $6,75 \times 10^{-12}$  para o ECC, superior ao obtido pelo ECC-REF deste trabalho. Apesar das diferenças na composição e das metodologias de ensaio não serem exatamente as mesmas, é possível obter uma base de comparação para os compósitos estudados. Desta forma, afirma-se que a substituição parcial do cimento por 30% de cinza de casca de arroz gera um efeito substancial na diminuição do coeficiente de difusão do compósito.

## 5.3 RETRAÇÃO

### 5.3.1 Retração livre

A Figura 38 apresenta os valores médios de retração livre em função do tempo para os concretos e compósitos estudados, determinada de acordo o item 4.4.3.1. Os resultados são apresentados em relação à média de três amostras por mistura. A retração de cada amostra foi medida, pelo menos, três vezes, para verificar a precisão da medição. A tabela completa dos resultados encontra-se no Apêndice G. A primeira leitura foi realizada 24 horas após a moldagem e prosseguiu-se até 28 dias, pois devido à limitação de tempo da pesquisa, não seria possível completar as 64 semanas prescrita pela norma. Com base no trabalho de Sahmaran *et al.* (2009), a partir dos 56 ou 84 dias, a retração por secagem nos compósitos começa a estabilizar-se. Já nos concretos, por não haver nenhuma fibra e pouca quantidade de cimento, a estabilização deve ocorrer mais cedo.

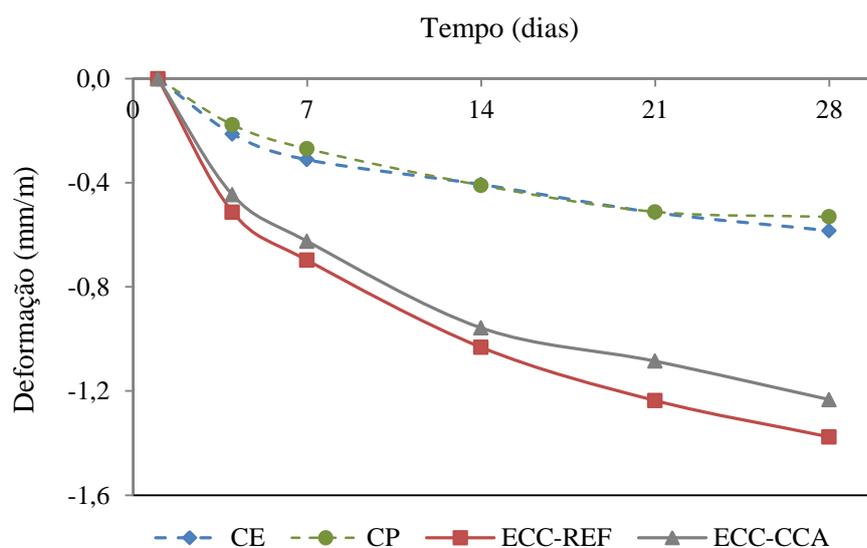


Figura 38 – Valores médios de deformação por retração livre em função do tempo.

As deformações médias obtidas para os concretos convencionais (CE e CP) encontram-se na mesma faixa de valores, havendo pouca diferença na retração dos materiais. O ECC-REF apresenta, dentre todas as amostras, a maior retração, cerca de 50% a mais que os concretos. Com a incorporação da cinza de casca de arroz no compósito (ECC-CCA), houve uma diminuição na deformação de apenas 10,5% aos 28 dias.

Apesar dos compósitos apresentarem deformações de retração superiores aos concretos, não se pode afirmar que as fibras não tenham capacidade significativa para conter as deformações

oriundas desse processo natural, já que não foram moldados corpos de prova de mesma composição, apenas sem a presença das fibras, para tal comparação. Sabe-se que, pela elevada quantidade de cimento nos compósitos (3,4 vezes mais para o ECC-REF em relação ao CE) e, conseqüentemente, elevada liberação de calor na hidratação, é natural que a retração seja, também, elevada.

É importante salientar que os resultados não contradizem os relatados na literatura (item 3.3.1), pois, no caso das fibras de polipropileno, a sua importância não está na diminuição da retração, e sim na diminuição do efeito da fissuração, ou seja, no aumento do número de fissuras de menores dimensões. No entanto, para verificar se o comportamento apresentando pelos compósitos é atípico, é importante a análise de outros estudos. No trabalho de Sahmaran *et al.* (2009), por exemplo, o ECC convencional com fibra de PVA e relação CV/CP = 1,2 (CV = cinza volante; CP = cimento Portland), apresentou retração 30% menor que o ECC-REF deste trabalho, aos 28 dias. Entretanto, deve ser considerado que o tamanho da amostra utilizada pelo autor (285 x 25 x 25 mm) era inferior ao adotado no estudo (285 x 75 x 75 mm) e, além disso, que as amostras foram seladas para que não houvesse perda de umidade, a fim de que a retração autógena fosse medida. Se o mesmo procedimento e dimensão do corpo de prova fossem utilizados, é provável que a retração do compósito também apresentasse valores mais altos, já que maiores volumes geram maior liberação de calor, assim como a não selagem gera maior perda de água. Entretanto, apesar das diferenças de metodologia, é possível comparar os resultados entre si e, assim, comprovar que os compósitos possuem uma elevada retração livre quando comparados a concretos convencionais.

Outro fator a ser levado em conta é que, conforme mencionado anteriormente, a adição de fibras parece alterar a estrutura de poros do concreto, em especial em termos do aumento do tamanho dos poros (WANG *et al.*, 2001; ALY *et al.*, 2008). Conforme mencionado no item 3.3.1, um aumento do diâmetro dos poros devido à incorporação de fibra de polipropileno, mesmo reduzindo a retração plástica, pode ser responsável pela maior retração por secagem, a qual ocorre pela evaporação da água capilar e adsorvida nos poros do material, sendo mais acentuada nas primeiras idades, devido a grande quantidade de água livre disponível e da menor quantidade de produtos hidratados. No caso dos compósitos estudados, a adição de fibra parece não aumentar o diâmetro dos poros, e sim a quantidade total de poros da amostra (conforme mostra os resultados no item 5.1), o que também pode gerar grande retração devido à elevada quantidade de água livre.

### 5.3.2 Retração restringida

As Figuras 39, 40, 41 e 42 mostram os gráficos da deformação do anel pelo tempo, referente a cada extensômetro (*strain gage*), para os concretos e compósitos estudados. Neste ensaio, diferentemente do anterior, a retração é restringida pelo anel que fica aderido ao corpo de prova. Cada anel, em seu interior, possui quatro extensômetros. Entretanto, o extensômetro de número três (Ext 03), presente no Anel 1 apresentou ruídos frequentes para todos os ensaios e, por isso, não foi incluído nos gráficos. O extensômetro de número 6 (Ext 06), presente no Anel 2, também apresentou ruídos no ensaio realizado para o ECC-REF e, portanto, foi desconsiderado.

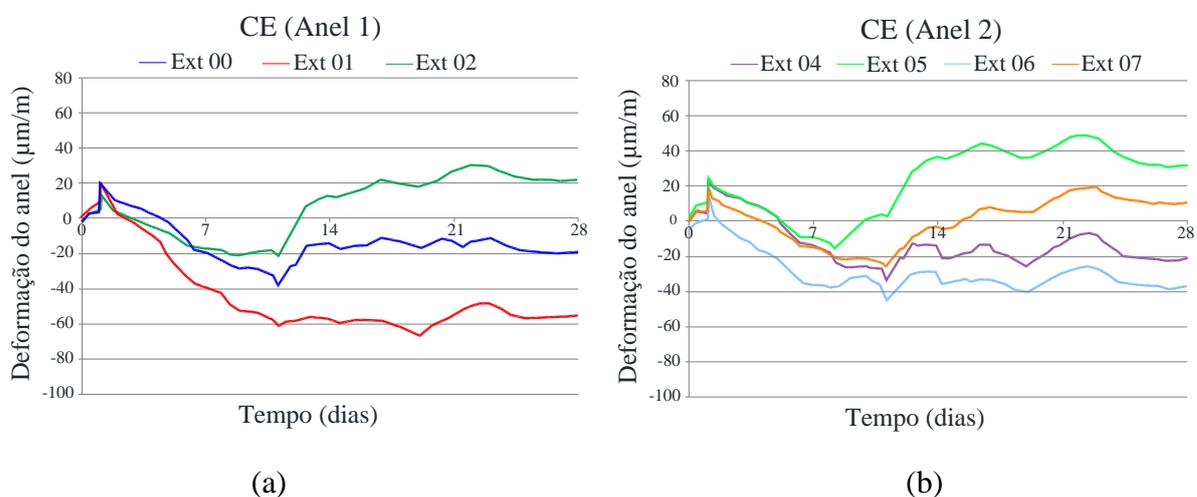


Figura 39 – Gráfico da deformação do anel *versus* tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Concreto Estrutural (CE).

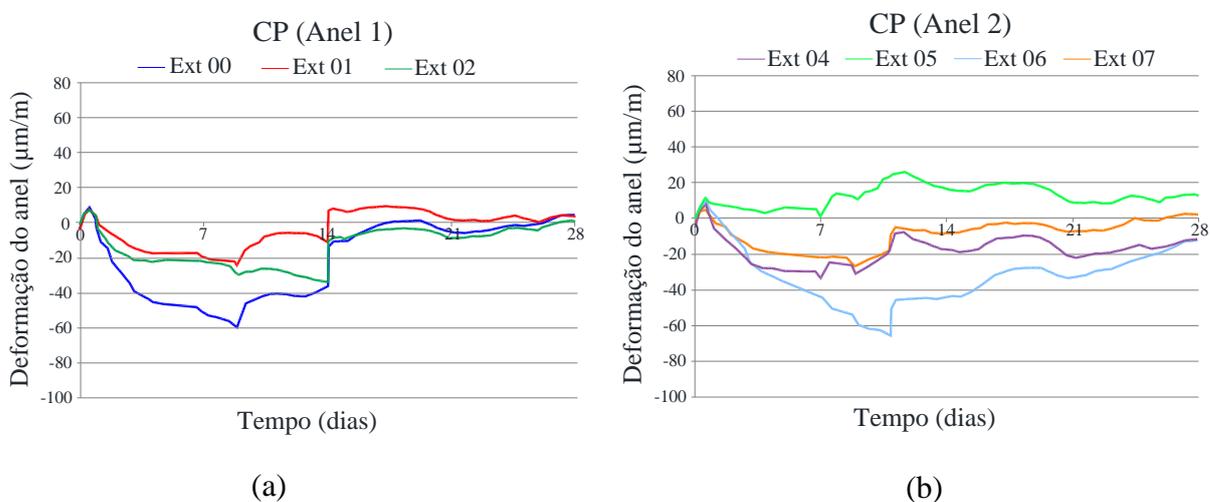


Figura 40 – Gráfico da deformação do anel *versus* tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Concreto Pavimento (CP).

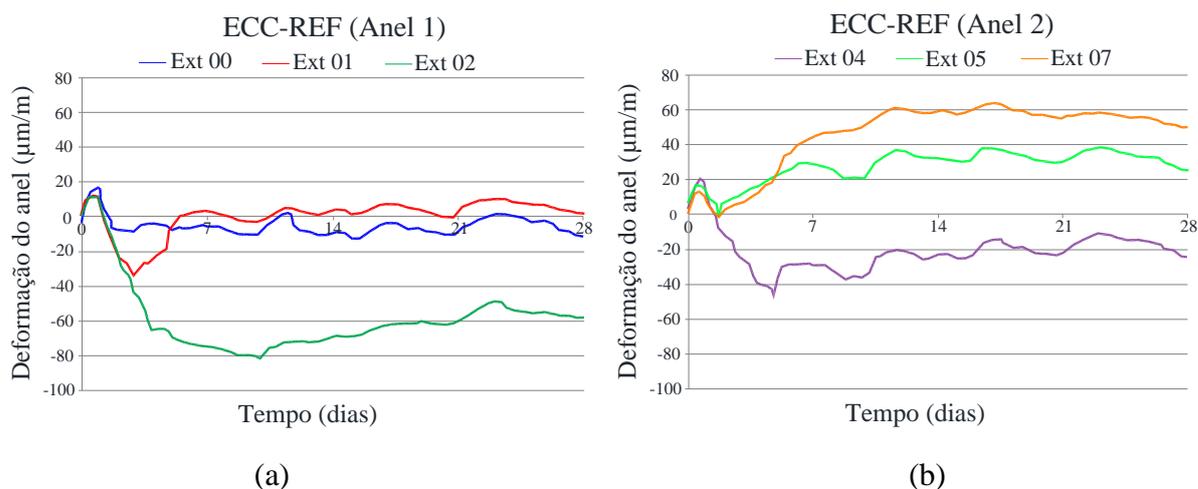


Figura 41 – Gráfico da deformação do anel *versus* tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Compósito de referência (ECC-REF).

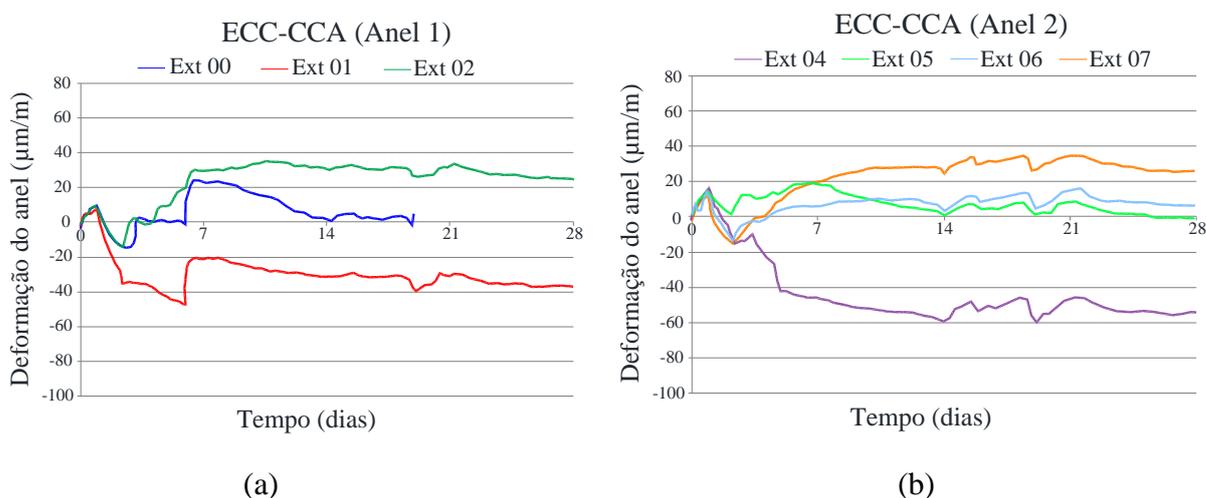


Figura 42 – Gráfico da deformação do anel *versus* tempo, anel 1 (a) e anel 2 (b) – Compósito com cinza (ECC-CCA).

É importante lembrar que as leituras foram realizadas a partir do lançamento do concreto/compósito na fôrma. O anel externo foi retirado após 24 horas. A partir dos resultados exibidos, em primeiro lugar, é possível perceber que as deformações aumentam após o lançamento, e decaem no momento em que a fôrma externa é retirada. Isto indica que as amostras se expandem devido às reações de hidratação nos primeiros momentos, gerando tensões de tração nos extensômetros.

O desenvolvimento da deformação no tempo, de maneira geral, atua com a diminuição da taxa e, então, após o pico máximo de deformação, gradualmente, é atingida uma fase quase estável, no qual a deformação mantém-se no mesmo intervalo. Portanto, os picos nas

deformações, onde a máxima é atingida, representa a abertura de uma ou mais fissuras no corpo de prova. A taxa de deformação então sofre um “relaxamento”, e uma estabilização ocorre. Para correlacionar as deformações máximas e abertura das fissuras atingidas por cada extensômetro juntamente com a data de fissuração, um mapeamento das fissuras de cada corpo de prova foi realizado, conforme apresentam as Figuras 43, 44, 45 e 46.

Analisando-se, pois, primeiramente, o concreto convencional (CE), nota-se no gráfico da Figura 39a, que a deformação atinge uma máxima de  $-66,48 \mu\text{m/m}$  no Ext 01, aos 18 dias. Porém, aos 11 dias, os Ext 00 e 02 já atingem suas deformações máximas. Dessa forma, pressupõe-se que a abertura da primeira fissura ocorreu aos 11 dias (entre o Ext 02 e Ext 03) e, a segunda, aos 18 dias (próxima ao Ext 01), conforme evidencia a Figura 43a. Em relação ao Anel 2, a deformação máxima é atingida pelo Ext 06, com um valor de  $-45,84 \mu\text{m/m}$ , também aos 11 dias, assim como para os extensômetros Ext 04 e 07. Entretanto, a deformação atingida pelo Ext 05 obteve sua máxima já aos 8 dias. Assim, com base no gráfico (Figura 39b) e conforme a Figura 43b, é possível presumir que a fissura situada entre o Ext 05 e 06 tenha ocorrido aos 8 dias, e a fissura próxima ao Ext 04 aos 11 dias.

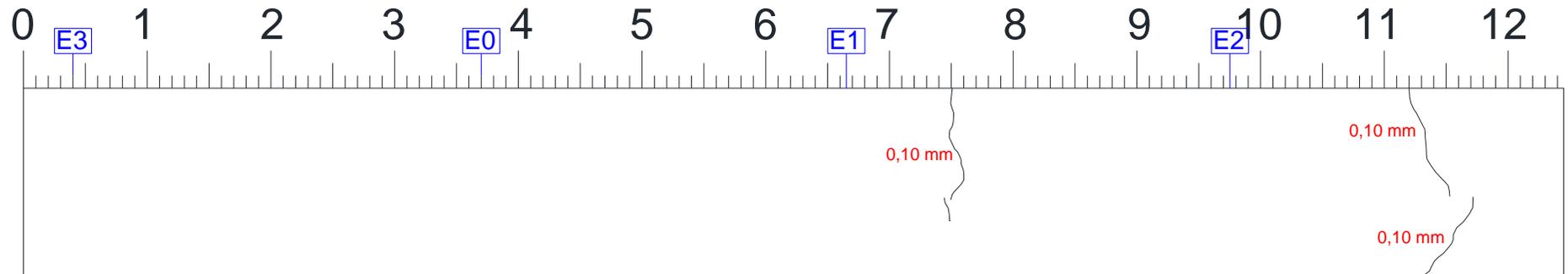
No concreto para pavimento (CP), em relação ao Anel 1 (Figura 40a), a deformação máxima é atingida pelo Ext 00, aos 9 dias, no valor de  $-60,48 \mu\text{m/m}$ . Nota-se que a fissura parece resistir ou abrir lentamente, até os 14 dias, onde rompe-se definitivamente. O que ocorre da mesma maneira para o Ext 01, porém com uma deformação máxima atingida inferior. Já o Ext 02, a máxima é alcançada somente aos 14 dias, no valor de  $-43,08 \mu\text{m/m}$ . A única fissura presente no corpo de prova, encontra-se localizada entre os Ext 00 e 01 (Figura 44a). O Ext 02, por estar situado no lado oposto à abertura da fissura, resistiu às tensões até os 14 dias, onde todos, de fato, atingiram suas máximas. Em relação ao Anel 2 (Figura 40b), a deformação máxima é atingida pelo Ext 06 ( $-68,40 \mu\text{m/m}$ ) aos 11 dias. Os extensômetros Ext 04 e 05 atingiram suas máximas aos 7 dias e o Ext 07 aos 9 dias. Nota-se, portanto, na Figura 44b, que a fissura encontra-se situada próxima ao Ext 04. Logo, o Ext 06, oposto a este e que continuou sua retração até os 11 dias, é o extensômetro mais afastado da abertura da fissura.

No ECC-REF, em relação ao Anel 1 (Figura 41a), a deformação máxima atingida corresponde ao Ext 02, no valor de  $-82,02 \mu\text{m/m}$ , aos 10 dias. No entanto, as máximas atingidas pelos Ext 00 e 01 ocorreram apenas aos 3 dias. Nota-se na Figura 45a, uma grande concentração de fissuras próximas aos Ext 00 e 01, mas, principalmente, ao Ext 00. Em relação a este, observa-se no gráfico, que a deformação mantém-se constante após atingir  $-11,28 \mu\text{m/m}$ , o

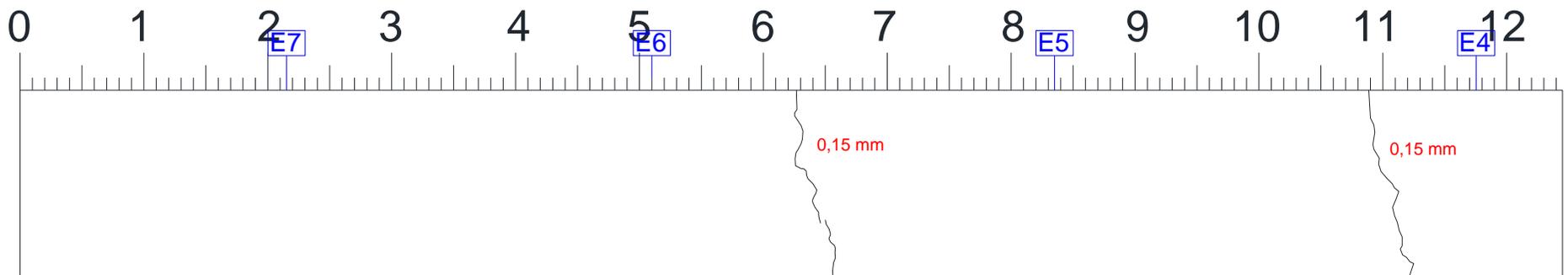
que induz a crer que as fissuras começaram, precocemente, a partir desse ponto. Já no Ext 01, houve uma queda maior na deformação até os 3 dias, o que indica que as fissuras foram se multiplicando rapidamente em direção a este. No Anel 2 (Figura 41b), a deformação máxima foi atingida pelo Ext 04 (-29,52  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) aos 3 dias. Os extensômetros Ext 05 e 07 apresentaram comportamento semelhante, atingindo suas deformações máximas apenas aos 2 dias. Cabe lembrar que o Ext 06 apresentou ruídos e não foi incluído ao gráfico. Percebe-se, portanto, na Figura 45b, que há uma maior concentração de fissuras na região que abrange o Ext 05 e 06. Pressupõe-se, dessa maneira, que as fissuras tenham começado nessa região e estendidas aos demais locais ao longo do perímetro do corpo de prova.

Por fim, no ECC-CCA, houve um ganho de resistência à retração quando comparado ao ECC-REF. No Anel 1 (Figura 42a), a deformação máxima foi atingida pelo Ex 01, aos 6 dias, no valor de -47,28  $\mu\text{m}/\text{m}$ , aproximadamente 1,7 vezes menor que a máxima obtida no ECC-REF referente ao Ext 02. Os extensômetros Ext 00 e 02 atingiram, no entanto, suas máximas aos 3 dias com deformações equivalentes. Porém, as fissuras presentes no corpo de prova apresentaram, em média, aberturas maiores que no ECC-REF, conforme pode ser observado na Figura 44. As fissuras de maiores dimensões encontram-se entre o Ext 00 e 01, e Ext 01 e 02 (Figura 46a). Nota-se, no gráfico, que aos 3 dias há um pico no Ext 01, representando o início da abertura da fissura. No entanto, a mesma parece resistir às tensões até os 14 dias, onde se rompe completamente. Em relação ao Anel 2 (Figura 42b), a deformação máxima é atingida pelo Ext 04 (-61,68  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) aos 14 dias. É possível observar, no gráfico, que houve um pico na deformação para todos extensômetros aos 3 dias, o que indica o início da fissuração. Na Figura 46b, nota-se que próximo ao Ext 04, não há presença de fissuras, o que justifica o valor maior de deformação obtido.

Para sintetizar os resultados descritos, de forma a facilitar a compreensão, as Tabelas 29, 30, 31 e 32 apresentam um resumo das tensões iniciais e máximas e, também, das idades de fissuração. A Tabela 33 apresenta os valores de taxa de tensão média (MPa/dia) para cada anel e amostra, calculada de acordo com a Equação 7 no item 4.4.3.2, e sua respectiva classificação quanto ao potencial de fissuração, conforme propõe a norma ASTM C1581 (2009). A taxa de tensão é calculada com base taxa de deformação ( $\text{mm}/\text{dia}^{1/2}$ ), obtida através da inclinação das retas, por regressão linear, das deformações até o momento da ruptura, pela raiz quadrada do tempo. Os gráficos de regressão linear para cada anel encontram-se no Apêndice H.

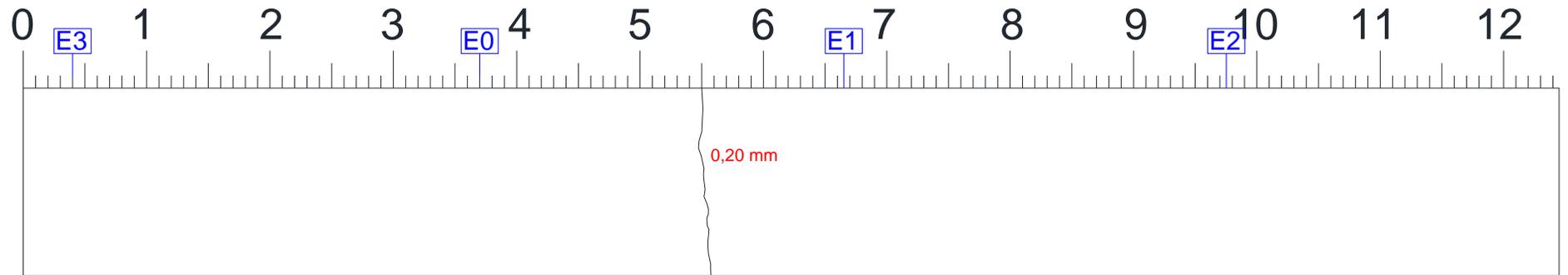


(a)

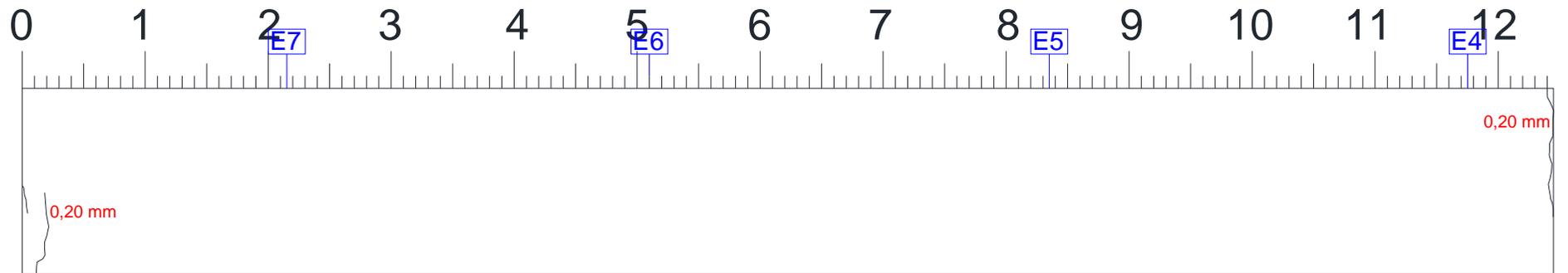


(b)

Figura 43 – Mapeamento das fissuras de retração restringida do Concreto Estrutural (CE): Anel 1 (a) e Anel 2 (b).

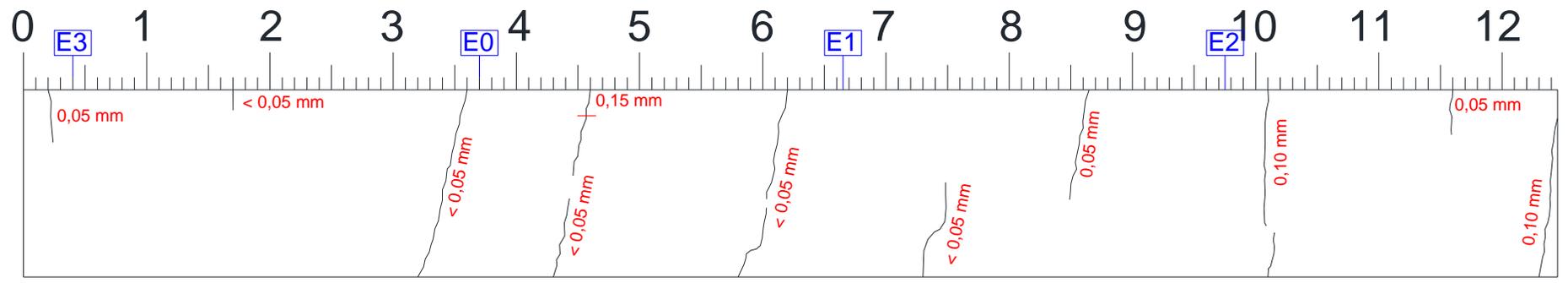


(a)

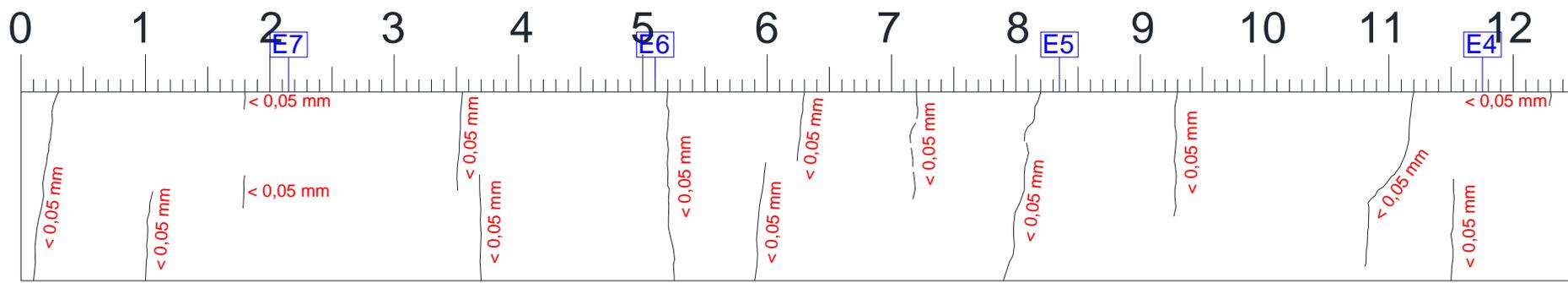


(b)

Figura 44 – Mapeamento das fissuras de retração restringida do Concreto Pavimento (CP): Anel 1 (a) e Anel 2 (b).



(a)



(b)

Figura 45 – Mapeamento das fissuras de retração restringida do Compósito de referência (ECC-REF): Anel 1 (a) e Anel 2 (b).



Tabela 29 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Concreto Estrutural (CE).

| <i>Extensômetros</i>                   | <i>Anel 1</i> |           |           |               | <i>Anel 2</i> |           |           |           |               |
|--|---------------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
|  | <i>00</i>     | <i>01</i> | <i>02</i> | <i>Média</i>  | <i>04</i>     | <i>05</i> | <i>06</i> | <i>07</i> | <i>Média</i>  |
| Idade de Fissuração (dias)             | 11            | 18        | 11        | <b>13</b>     | 11            | 8         | 11        | 11        | <b>10</b>     |
| Deformação Inicial ( $\mu\text{m/m}$ ) | 18,48         | 19,68     | 13,20     | <b>17,12</b>  | 21,84         | 24,96     | 12,72     | 18,48     | <b>19,50</b>  |
| Deformação Máxima ( $\mu\text{m/m}$ )  | -38,40        | -66,48    | -22,80    | <b>-42,56</b> | -34,08        | -15,84    | -45,84    | -26,88    | <b>-30,66</b> |

Tabela 30 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Concreto Pavimento (CP).

| <i>Extensômetros</i>                   | <i>Anel 1</i> |           |           |               | <i>Anel 2</i> |           |           |           |               |
|--|---------------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
|  | <i>00</i>     | <i>01</i> | <i>02</i> | <i>Média</i>  | <i>04</i>     | <i>05</i> | <i>06</i> | <i>07</i> | <i>Média</i>  |
| Idade de Fissuração (dias)             | 9             | 9         | 13        | <b>10</b>     | 7             | 7         | 11        | 9         | <b>9</b>      |
| Deformação Inicial ( $\mu\text{m/m}$ ) | 0,00          | 3,12      | 1,92      | <b>1,68</b>   | -2,16         | 6,00      | -0,96     | -1,68     | <b>0,30</b>   |
| Deformação Máxima ( $\mu\text{m/m}$ )  | -60,48        | -24,72    | -34,08    | <b>-39,76</b> | -36,96        | -0,48     | -68,40    | -28,56    | <b>-33,60</b> |

Tabela 31 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Compósito Referência (ECC-REF).

| <i>Extensômetros</i>                   | <i>Anel 1</i> |           |           |               | <i>Anel 2</i> |           |           |           |               |
|--|---------------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
|  | <i>00</i>     | <i>01</i> | <i>02</i> | <i>Média</i>  | <i>04</i>     | <i>05</i> | <i>06</i> | <i>07</i> | <i>Média</i>  |
| Idade de Fissuração (dias)             | 3             | 3         | 10        | <b>5</b>      | 3             | 2         | -         | 2         | <b>2</b>      |
| Deformação Inicial ( $\mu\text{m/m}$ ) | 15,12         | 8,88      | 8,64      | <b>10,88</b>  | 16,08         | 13,92     | -         | 10,08     | <b>13,36</b>  |
| Deformação Máxima ( $\mu\text{m/m}$ )  | -11,28        | -33,84    | -82,02    | <b>-42,38</b> | -29,52        | -1,92     | -         | -1,44     | <b>-10,96</b> |

Tabela 32 – Idade de fissuração, deformação inicial e máxima do ensaio de retração restringida – Compósito com Cinza de Casca de Arroz (ECC-CCA).

| <i>Extensômetros</i>                   | <i>Anel 1</i> |           |           |               | <i>Anel 2</i> |           |           |           |               |
|--|---------------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
|  | <i>00</i>     | <i>01</i> | <i>02</i> | <i>Média</i>  | <i>04</i>     | <i>05</i> | <i>06</i> | <i>07</i> | <i>Média</i>  |
| Idade de Fissuração (dias)             | 3             | 6         | 3         | <b>4</b>      | 14            | 14        | 3         | 3         | <b>9</b>      |
| Deformação Inicial ( $\mu\text{m/m}$ ) | 8,64          | 5,52      | 7,92      | <b>7,36</b>   | 14,88         | 13,68     | 7,20      | 6,96      | <b>10,68</b>  |
| Deformação Máxima ( $\mu\text{m/m}$ )  | -15,12        | -47,28    | -14,40    | <b>-25,60</b> | -61,68        | -1,68     | -12,48    | -16,80    | <b>-12,16</b> |

Tabela 33 – Taxa de tensão média entre extensômetros e anéis, e classificação do potencial de fissuração de cada concreto/compósito.

| <i>Concreto/Compósito</i>   | <i>CE</i>                     | <i>CP</i>                     | <i>ECC-REF</i> | <i>ECC-CCA</i> |              |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|--------------|
| Taxa de tensão<br>(MPa/dia) | Anel 1                        | 0,190                         | 0,167          | 0,911          | 1,046        |
|                             | Anel 2                        | 0,214                         | 0,210          | 1,723          | 0,398        |
|                             | <b>Média</b>                  | <b>0,202</b>                  | <b>0,188</b>   | <b>1,317</b>   | <b>0,722</b> |
| Potencial de fissuração     | <i>Moderadamente<br/>alto</i> | <i>Moderadamente<br/>alto</i> | <i>Alto</i>    | <i>Alto</i>    |              |

Nas Tabelas 29, 30, 31 e 32, ao analisar a idade média de fissuração, observa-se que a abertura de fissuras ocorre mais cedo para o ECC-REF, seguida do ECC-CCA e dos concretos convencionais CE e CP. Comparando-se, pois, o comportamento entre os concretos, o CP, apesar de conter maior quantidade de cimento em sua composição, possui maior resistência mecânica e uma microestrutura mais compacta (menor quantidade de poros), o que justifica sua maior resistência à abertura de fissuras quando comparado ao CE.

Já entre os compósitos, o fator que contribuiu efetivamente para diminuição da retração e idade média de fissuração, foi a presença da cinza de casca de arroz. No estudo realizado por Righi (2015), através da análise de curvas de liberação de calor de hidratação durante 7 dias, observou-se que o ECC-REF atingiu uma temperatura de até 50°C nas primeiras 24 horas, para um volume de apenas 1,81 cm<sup>3</sup> de massa de compósito. O ECC-CCA, no entanto, reduziu o pico de temperatura para aproximadamente 35°C nas primeiras 24 horas. Este fato é explicado, provavelmente, pela reação pozolânica da cinza, que ocorre de forma mais lenta. Tais dados auxiliam na explicação dos resultados obtidos para o ensaio de retração, já que o aparecimento das primeiras fissuras no anel de ECC-REF ocorreu mais cedo que no ECC-CCA.

As taxas de tensão apresentadas na Tabela 33 representam a reação média de compressão devido à retração gerada em cada anel. Assim, evidencia-se, de fato, que os compósitos retraem mais que os concretos convencionais, mesmo porque possuem uma quantidade de cimento de até 3 vezes mais. Entretanto, com a incorporação da cinza de casca de arroz, ocorreu uma diminuição de 45% na taxa de tensão média (entre anéis) do compósito. Em contrapartida, houve um aumento do número de fissuras de maiores dimensões, como pôde ser observado nas Figuras 45 e 46.

Conforme mencionado no item 3.3.1 e 5.3.1, a presença das fibras de polipropileno na mistura, não gera, necessariamente, a diminuição da retração, e sim a diminuição do efeito da fissuração, isto é, no aumento do número de fissuras de menores dimensões. Tal fato pôde ser observado apenas para o ECC-REF, pois o ECC-CCA apresentou algumas fissuras com diâmetro de até 150  $\mu\text{m}$ , semelhantes às obtidas nos concretos convencionais. Acredita-se que, devido a maior quantidade de poros presentes no ECC-CCA e, conseqüentemente, a menor compacidade da matriz, é provável que as fissuras tenham mais facilidade na propagação, ocasionando maiores aberturas. A Figura 47 mostra um aspecto geral dos corpos de prova de cada concreto/compósito.

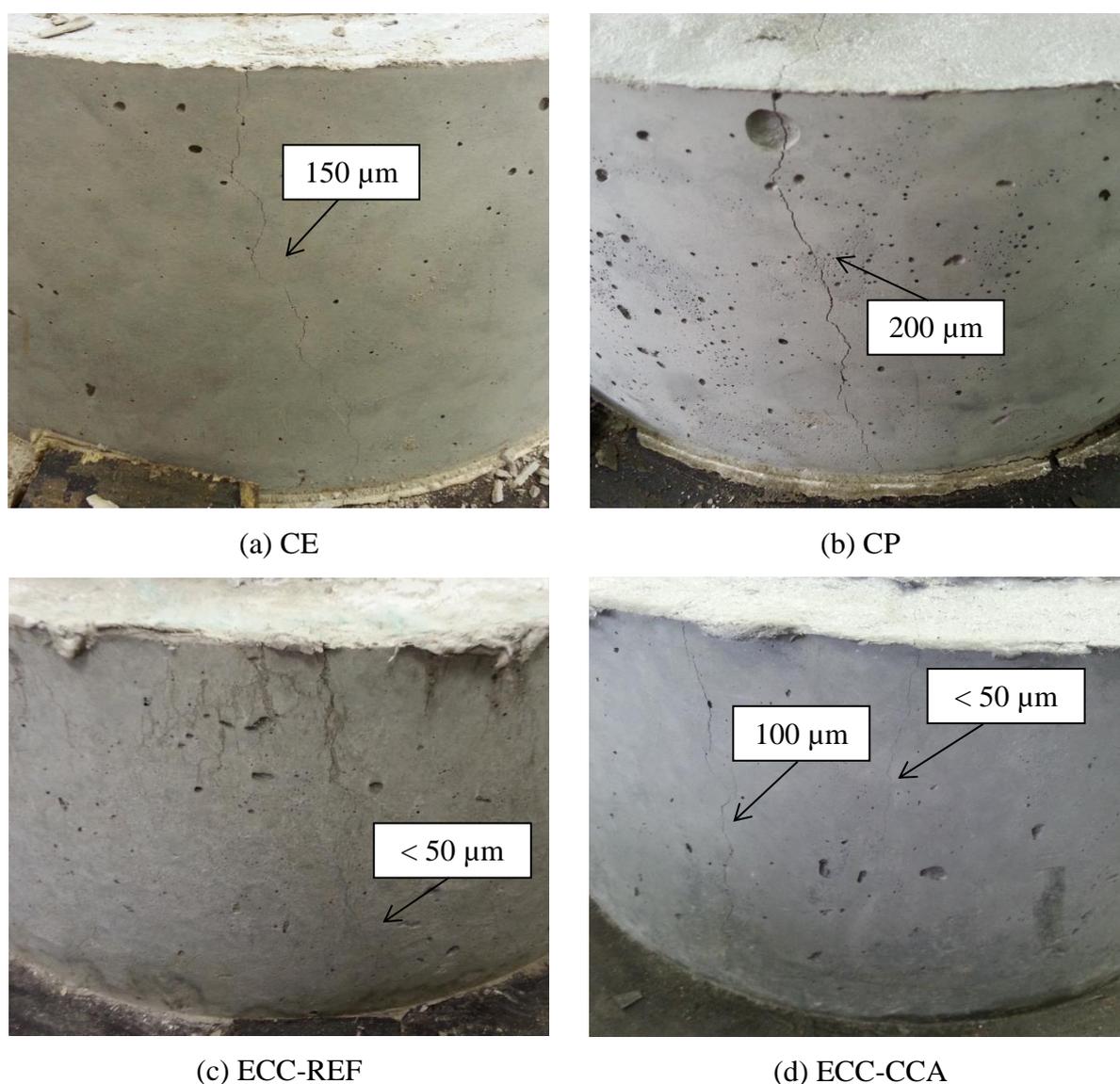


Figura 47 – Aspecto geral de um dos corpos de prova no ensaio de retração restringida.

Outro fator que auxilia a compreensão dos resultados, também mencionado no item 3.3.1, é que, para os compósitos cimentícios como o ECC, a curva tensão de fissuração *versus* abertura de fissuras ( $\sigma$ - $\delta$ ), em idades mais precoces, não é totalmente desenvolvida para resistir às tensões internas e, assim, retrações autógenas podem levar a formação de algumas microfissuras (menores de 100  $\mu$ m), conforme evidenciado. Todavia, em idades mais avançadas, uma vez que as cargas mecânicas são aplicadas ao material, a curva  $\sigma$ - $\delta$  é suficientemente desenvolvida para resistir a qualquer fissura localizada, devido à forte ponte gerada pela fibra. Tais fatos não poderiam ocorrer nos concretos convencionais, já que sua resistência à tração é baixa e conferida apenas pela armadura, quando presente.

## 5.4 ABRASÃO

A Figura 48 mostra a perda de massa por abrasão dos concretos e compósitos, calculadas de acordo com o item 4.4.4. Neste ensaio, três corpos de prova íntegros são colocados concomitantemente na máquina de abrasão Los Angeles e, posteriormente às rotações, são verificadas suas perdas de massa. Não há barras de desvio padrão na Figura 48, pois foram moldados, ao todo, três corpos de prova para cada concreto/compósito, não havendo, portanto, repetições no ensaio. Cabe frisar que existe uma grande quantidade de ensaios para verificação do desgaste por abrasão, tanto para estruturas hidráulicas, como pavimentação (ver item 3.4). Entretanto, devido à limitação de tempo e infraestrutura necessários para execução de qualquer um dos experimentos, optou-se pela realização deste, já que confere um indicativo importante e relevante para comparação entre os materiais.

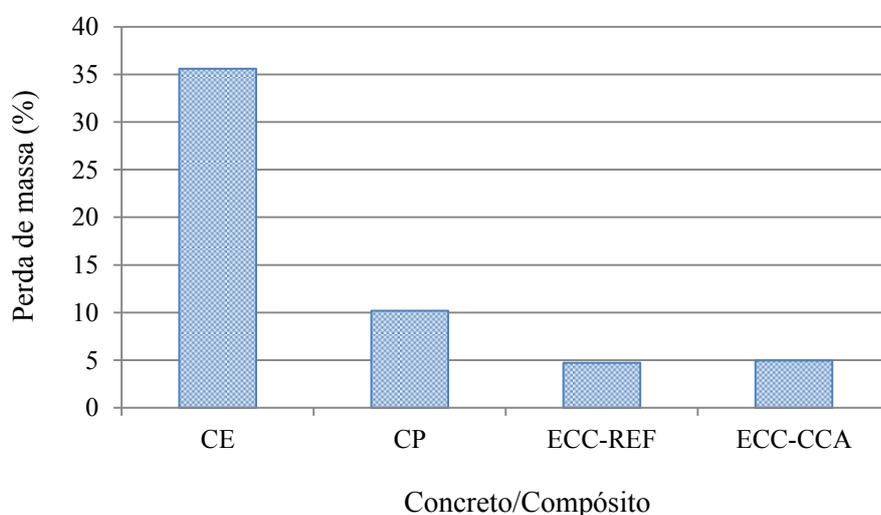


Figura 48 – Valores de perda de massa por abrasão.

Ao analisar a Figura 48, nota-se que as perdas de massa para os compósitos ECC-REF e ECC-CCA foram praticamente iguais, em torno de apenas 5%. Os concretos convencionais CE e CP apresentaram maiores perdas de massa, com valores de aproximadamente 35% e 10%, respectivamente, o que representa 7 e 2 vezes mais que os compósitos. Tais resultados encontram-se de acordo com o esperado, pois, conforme descrito no item 3.4, a incorporação de fibras de polipropileno aumenta a resistência à abrasão de compósitos quando comparado a concretos convencionais. Alguns autores também afirmam que adições minerais geram um aumento da resistência à abrasão, o que não foi obtido no presente ensaio. Porém, em virtude da não repetição do experimento, não se pode afirmar precisamente do efeito da cinza na resistência à abrasão do compósito. A Figura 49 mostra o aspecto dos corpos de prova após o ensaio de abrasão Los Angeles.



(a) CE



(b) CP



(c) ECC-REF



(d) ECC-CCA

Figura 49 – Aspecto geral dos corpos de prova no ensaio de abrasão Los Angeles.

Através da Figura 49, nota-se que as amostras de ECC-CCA, mesmo com perda de massa total semelhante ao obtido pelo ECC-REF, quebraram-se durante o ensaio. As amostras de ECC-REF, no entanto, mantiveram-se praticamente íntegras, apenas com suas bordas quebradas. Assim, é possível intuir, de todo modo, que o compósito de referência tende a possuir maior resistência à abrasão do que o compósito com cinza. Acredita-se que isto se deva ao fato da incorporação da cinza conferir uma maior quantidade de poros à matriz, diminuindo sua resistência. No entanto, são necessários maiores repetições do experimento para confirmação do comportamento.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com base nos resultados apresentados, fornecendo respostas para as perguntas estabelecidas no Capítulo 1. O presente capítulo também fornece algumas recomendações para trabalhos futuros, no intuito de complementar os aspectos de durabilidade dos compósitos que não foram abordados neste trabalho.

### 6.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo analisar questões de durabilidade dos compósitos cimentícios de elevada deformação (*ECC*) com a utilização de fibras de polipropileno e cinza da casca de arroz, comparando-os a concretos convencionais, visando sua utilização em estruturas de concreto (edificações e rodoviárias).

Os resultados relacionados à estrutura de poros (absortividade, absorção e índice de vazios, absorção de água por capilaridade e absorção pelo cachimbo) mostram, de maneira geral, que os compósitos possuem maior quantidade de poros que os concretos convencionais. Através de análises específicas, pode-se concluir que:

- A presença de fibras nos compósitos aumenta a quantidade total de poros em comparação aos concretos convencionais. Tal quantidade de poros está provavelmente situada na zona interfacial entre as fibras e a matriz cimentícia. Acredita-se que as fibras de polipropileno, por serem finas e pequenas, apresentam um maior volume de zonas interfaciais com a matriz, do que as zonas interfaciais entre o agregado graúdo e a matriz presente nos concretos. Além disso, acredita-se que a quantidade menor de poros existentes nos concretos pode ser justificada, principalmente, pela presença dos agregados graúdos, uma vez que são inertes, não absorvem água, e ocupam um grande volume do material. Estas hipóteses são tidas como base através da maior absortividade, absorção e índice de vazios, obtidas para os compósitos.
- A elevada taxa de absorção e resistência capilar mais baixa obtida para o *ECC-REF* indica a presença de poros capilares mais refinados quando comparado aos outros

materiais, o que foi confirmado pela elevada altura de ascensão de água resultante no ensaio de absorção de água por capilaridade.

- O ECC-CCA apresentou maior absorção e índice de vazios em comparação ao ECC-REF, apontando que a incorporação da cinza aumenta a quantidade total de poros do compósito. Porém, devido à diminuição da taxa de absorção e aumento da resistência capilar, acredita-se que a cinza tenha alterado a tortuosidade e conexão dos poros capilares. Tais fatos foram confirmados pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, no qual a água não conseguiu subir pelos capilares do corpo de prova e, também, pelas imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV).
- As análises ANOVA realizadas nos ensaios que abrangem a estrutura de poros, admitindo os traços como equivalentes, fornecem um indicativo de que não há influência do tempo de cura (de 28 para 91 dias) dos compósitos ECC-CCA. Acredita-se, portanto, que a cinza de casca de arroz utilizada neste trabalho, devido ao tempo de moagem de 8 horas, pode reagir rapidamente aos 28 dias, no qual provavelmente ocorrem quase todas as reações de hidratação, já que não foram observadas alterações significativas na estrutura de poros do material em idades mais avançadas. Este fato pode ser verificado pelo elevado índice de atividade pozolânica aos 28 dias.

Em relação aos mecanismos de transportes referentes à ação de cloretos, verifica-se que a presença da cinza no compósito reduz substancialmente o seu transporte no interior do material. Como demais conclusões pontuais, afirma-se que:

- Testes de migração elétrica para materiais com grande quantidade de cimento não são considerados eficientes, uma vez que uma grande quantidade de íons é transportada, além dos íons cloretos, influenciando os resultados. Tais íons são oriundos da dissociação de elementos presentes na solução de poros dos materiais devido às reações de hidratação. Portanto, testes de penetração acelerada não devem ser usados como indicativo de permeabilidade a agentes agressivos em materiais como o compósito estudado neste trabalho. Entretanto, servem como um indicador de controle de qualidade na comparação de materiais de mesmas proporções de mistura. O ensaio serviu, contudo, para mostrar a provável capacidade de combinação de cloretos do compósito quando a cinza é incorporada.

- Acredita-se que a cinza de casca de arroz tem um efeito significativo sobre a química ou a condutividade elétrica da solução de poros do compósito, devido à elevada redução da carga elétrica no ensaio de penetração acelerada, quando comparado ao ECC-REF. É provável que a diminuição da condutividade elétrica da solução de poros ocorra devido à diminuição dos íons  $\text{OH}^-$  nas reações de hidratação secundárias. A cinza de casca de arroz incorpora mais álcalis nos produtos de hidratação do que os libera na solução de poros, o que resulta em uma concentração alcalina mais baixa ou menor valor de pH na solução de poros, diminuindo, conseqüentemente, a condutibilidade de íons.
- De 28 para 91 dias houve uma redução de 59% da carga elétrica no ensaio de penetração acelerada de íons cloretos. Acredita-se, assim, que a cinza de casca de arroz continue gerando alterações na composição química da solução aquosa dos poros, provocada pelas reações pozolânicas em idades avançadas. Apesar de não ter alterado significativamente a microestrutura do compósito de 28 para 91 dias, é possível que alguns grãos não hidratados comecem seu processo de hidratação consumindo íons presentes da solução de poros.
- Acredita-se que, além da diminuição do transporte de íons totais pelas reações de hidratação, existe o fator “*capacidade de combinação de cloretos*” existente nos compósitos com cinza, o que reduz a mobilidade dos íons cloretos. Uma vez que as diminuições nas cargas elétricas foram substanciais, é possível que tenha ocorrido a formação do sal de Friedel, devido às reações do íon cloreto com a alumina reativa presente na pozolana.
- O ensaio de difusão de íons cloreto ressaltou a hipótese de capacidade de combinação de cloretos da cinza, devido ao menor coeficiente de difusão ( $D_{app}$ ) obtido (54% menor que o ECC-REF). Como neste ensaio não há mobilidade de outros íons, senão os cloretos, o fato mais plausível na justificativa de tal resultado se deve a capacidade de ligação/combinação. Acredita-se que o efeito físico de alteração da tortuosidade e conexão dos caminhos capilares também tenha influenciado diretamente nos

resultados. Entretanto, o principal fator atuante na diminuição do coeficiente se deve, provavelmente, a capacidade de combinação.

Com relação aos ensaios de retração, verifica-se, de maneira geral, que os compósitos possuem retrações mais elevadas que os concretos, o que está diretamente relacionado com o consumo de cimento dos mesmos, pois representam cerca de 2 a 3 vezes mais que os concretos convencionais. Como conclusões específicas, pode-se citar que:

- Acredita-se que a maior quantidade de poros gerada pelas zonas de transição das fibras com a matriz, seja responsável pela maior retração por secagem (retração livre) obtida pelos compósitos, devido à evaporação da água capilar e adsorvida. Esta retração é mais acentuada nas primeiras idades, devido a grande quantidade de água livre disponível e da menor quantidade de produtos hidratados.
- A substituição do cimento por 30% de cinza de casca de arroz não acarretou em diminuição considerável da retração livre. Presume-se, dessa forma, que a redução da quantidade de calor liberado na hidratação, típico da incorporação de cinza, não foi suficiente para afetar o comportamento de retração de forma marcante. Possivelmente, os fatores dominantes estão relacionados aos componentes autógenos e de secagem.
- No ensaio de retração restringida, os compósitos apresentaram, em geral, menores valores de deformação média, o que não indica menor retração em relação aos concretos, e sim que a fissuração nos mesmos ocorreu mais precocemente. Tal fato foi comprovado pela idade média de fissuração obtida.
- A incorporação de cinza no compósito diminuiu a retração restringida de modo que a idade do início da fissuração foi, em média, estendida. No entanto, a quantidade de fissuras, bem como o diâmetro das aberturas, foram maiores do que as obtidas no ECC-REF.
- Acredita-se que, em idades precoces, a ponte entre a fibra e a matriz não está totalmente consolidada, o que faz com que o compósito não seja capaz de resistir suficientemente às tensões internas e, assim, retrações autógenas acabam levando à formação das microfissuras (menores de 100  $\mu\text{m}$ ) presentes nos corpos de prova. Isto

ocorre porque, nas idades iniciais, a curva tensão de fissuração *versus* abertura de fissuras ( $\sigma$ - $\delta$ ) ainda não está totalmente desenvolvida para resistir a tais tensões.

- Em suma, as taxas de tensões (MPa/dia) calculadas para cada concreto e compósito no ensaio de retração restringida, mostram que, de fato, os compósitos retraem mais que os concretos e possuem alto potencial de fissuração. Tais fissuras, no entanto, apresentam, em média, menores aberturas no caso do ECC-REF, e aberturas equivalentes no ECC-CCA.

Por fim, em relação ao ensaio de abrasão, conclui-se que os compósitos apresentam menor perda de massa quando comparados aos concretos convencionais. Esse comportamento pode indicar que, conforme prevê a literatura, a fibra auxilia na manutenção da integridade, acarretado em aumento da resistência à abrasão. Ao comparar apenas os compósitos, não foram verificadas diferenças marcantes, indicando que a presença de cinza de casca de arroz, aparentemente, não gera influências no desgaste abrasivo.

## 6.2 RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DA PESQUISA

Esta seção fornece respostas para as questões de pesquisa levantadas no Capítulo 1, as quais podem ser obtidas a partir da compreensão dos resultados deste estudo.

Quanto à influência da substituição e não substituição do cimento por cinza de casca de arroz e adição de fibras de polipropileno na quantidade, dimensão e distribuição dos poros da matriz e como estes contribuem para a entrada de substâncias dissolvidas: as fibras de polipropileno afetam a estrutura de poros do compósito quando comparado a um concreto convencional. Acredita-se que as zonas de transição das fibras com a matriz são mais numerosas e porosas do que as zonas de transição do agregado graúdo com a matriz em concretos. Em relação à substituição do cimento por cinza de casca de arroz, esta gera maior quantidade total de poros à matriz, alterando, entretanto, a tortuosidade e conexão destes poros, o que dificulta a percolação de substâncias dissolvidas. Presume-se, portanto, que a incorporação de cinza melhora a microestrutura do compósito, no sentido de dificultar a passagem de água e agentes agressivos.

Quanto ao risco relacionado à penetração e difusão de cloretos nos compósitos, quando aplicados em elementos armados localizados em zonas marinhas, como em edificações, rodovias e estruturas de pontes: o compósito de referência, sem a substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, apresenta um risco maior de penetração e difusão de cloretos quando comparado a concretos convencionais, não sendo recomendado, portanto, sua utilização em zonas de risco. Já o compósito com substituição parcial do cimento por cinza, apresenta um ganho considerável quanto à penetração e difusão de cloretos, sendo, até mesmo, semelhante ou superior aos concretos. Dessa forma, é possível utilizá-lo como reforço ou construção de novas estruturas, seja em pontes ou rodovias. Este ganho é conferido pela alteração na estrutura e solução de poros do compósito, e pela capacidade de combinação de cloretos, diminuindo a quantidade livre disponível para corrosão de armaduras.

Quanto ao nível de retração e abertura de fissuras nos compósitos: os compósitos, com e sem a incorporação de cinza de casca de arroz, apresentam maiores níveis de retração e quantidade de fissuras quando comparados a concretos convencionais. O compósito de referência, entretanto, acarreta em aberturas de fissuras inferiores. Já o compósito com cinza, apesar de diminuir a retração e o tempo de surgimento das fissuras, acarreta em algumas com aberturas semelhantes às obtidas nos concretos (em torno de 100 e 150  $\mu\text{m}$ ). Neste caso, a diminuição da retração no compósito não compensa as maiores aberturas de fissuras geradas pelo fenômeno de retração restringida, uma vez que são estas as responsáveis pelo fácil acesso à entrada de agentes agressivos. Neste sentido, o compósito de referência torna-se melhor que o compósito com cinza. Por outro lado, levando em consideração que uma estrutura, além de estar submetida a retrações restringidas, está também submetida a cargas mecânicas, os compósitos tornam-se melhores que os concretos convencionais. Em idades mais avançadas, a ponte de aderência desenvolvida entre a fibra e a matriz dificulta a propagação e expansão de fissuras, como podem ocorrer em estruturas de concreto convencionais. Assim, qualquer um dos compósitos torna-se mais eficiente que os concretos.

Quanto à resistência à abrasão dos compósitos: os compósitos apresentam resistência à abrasão consideravelmente maior que concretos convencionais. A substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, no entanto, não influencia significativamente na perda de massa, quando comparado ao compósito de referência. Apesar disso, acredita-se que qualquer compósito seria mais eficiente que um concreto convencional, em situações de constante desgaste superficial.

Quanto aos principais benefícios e/ou desvantagens, em termos de durabilidade, quando se aplica o ECC (com fibras de polipropileno e com e sem a utilização de cinza de casca de arroz) em relação a concretos convencionais: ambos os compósitos apresentam benefícios e desvantagens dependendo do aspecto em que são avaliados e da aplicação desejada. O compósito com cinza de casca de arroz, por exemplo, apresenta vantagens quanto à microestrutura em relação aos concretos convencionais, pois, possivelmente, dificulta a passagem de substâncias pela desconexão dos caminhos capilares, além de diminuir a penetração e difusão de cloretos e aumentar, ainda, a resistência à abrasão. Sua principal desvantagem está na quantidade e abertura de fissuras geradas em idades precoces, devido ao fenômeno de retração restringida. O compósito de referência, sem a presença de cinza, possui mais desvantagens em relação ao anterior. Sua estrutura de poros é prejudicada pela conexão dos mesmos, sendo mais permeável, até mesmo, que os concretos convencionais. Tal fato facilita a percolação de cloretos, confirmado pelo elevado coeficiente de difusão e o ensaio de permeabilidade. A sua principal vantagem em relação aos outros materiais, no que tange à durabilidade, está somente na diminuição da abertura de fissuras ocasionadas na retração restringida. Mas, como sua taxa de absorção é elevada, assim como a conexão entre os poros, é possível que o fato de as fissuras apresentarem menores dimensões, não compense positivamente a possibilidade de propagação de agentes agressivos.

Como conclusão geral, a partir das questões levantadas, é possível afirmar que o resultado em utilizar um material cimentício suplementar como a cinza de casca de arroz, vai além de ganhos relacionados apenas a destinação de um resíduo. O compósito com substituição do cimento pela cinza possui vantagens que unifica um conjunto de fatores desejáveis para aplicação de um material em estruturas diversas, isto é, ganhos mecânicos, de sustentabilidade ambiental e de durabilidade.

### 6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os itens a seguir listam recomendações para trabalhos futuros, com o objetivo de entender algumas questões que, principalmente pela restrição de tempo, não foram abordadas neste trabalho.

- Diferentes teores de fibras e a combinação de diferentes materiais cimentícios suplementares devem ser estudados de forma a descobrir a composição ideal que ofereça o melhor desempenho em termos de comportamento mecânico e de

durabilidade. Outros tipos de fibras também devem ser considerados, o que pode influenciar significativamente os resultados.

- Os compósitos cimentícios (*ECC*) possuem grande consumo de cimento, o que eleva o custo do material. Neste sentido, o estudo de novas composições, incluindo fibras e materiais cimentícios suplementares, além de visar um melhor desempenho, deve ser aliado ao custo de produção do compósito.
- A distribuição e tamanho dos poros dos compósitos, assim como dos concretos, devem ser estudados por outros procedimentos experimentais mais específicos, tais como o uso de PIM (porosimetria por intrusão de mercúrio). Isso contribui no entendimento se a inclusão de fibras gera descontinuidades na matriz do compósito.
- Estudos de outros processos de deterioração devem ser levados em conta, tais como: ataque de sulfatos, corrosão devido à carbonatação, outros métodos de abrasão (jato de água, cortador rotativo, etc.), simulação de corrosão, processo de gelo-degelo e fadiga. Além disso, é interessante o estudo de dois ou mais processos simultaneamente.
- O teste de difusão de cloretos deve ser avaliado através da utilização de um maior número de amostras, no intuito de levar em conta a variabilidade normalmente encontrada quando se lida com testes experimentais.
- Estudos experimentais têm investigado e demonstrado que as fissuras em materiais cimentícios têm a capacidade de selar-se, isto é, a água que flui através do compósito fissurado diminui ao longo do tempo. Em casos extremos, estas fissuras podem selar-se completamente. Diante disso, é importante o estudo da possível capacidade de auto-cura (*self-healing*) deste material quando fissurado. Esta avaliação pode ser feita através de ciclos de molhagem e secagem nos compósitos com diferentes aberturas de fissuras induzidas.

## REFERÊNCIAS

- AL-KHALAF, M.N.; YOUSIFF, H.A. Use of rice husk ash in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 6, n. 4, p. 241–248, 1984.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Valores críticos de cloruros para despassivar aceros de refuerzo embebidos em um mortero estandarizado de cimento portland. In: IV CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2., 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1997. p. 555-562.
- AL-TAYYIB, A.-H. J.; AL-ZAHRANI, M. M. Corrosion of Steel Reinforcement in Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Structures. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 2, p. 108–113, 1990.
- ALY, T.; SANJAYAN, J. G.; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. **Materials and Structures**, v. 41, p. 1741-1753, 2008.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Control of Cracking in Concrete Structures**. Committee 224. ACI 224R-01. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, 46 pp, 2001.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Guide to Durable Concrete**. ACI 201. 2R. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Report Card for America's Infrastructure**. 2013. Disponível em: [www.asce.org/reportcard](http://www.asce.org/reportcard). Acesso em: 18 jun. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for length change of cast, drilled, or sawed specimens of hydraulic-cement mortar and concrete**. ASTM C 341. Philadelphia, U.S, 2006c.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes**, ASTM C 1585. Philadelphia, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. ASTM C 642. Philadelphia, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.** ASTM C 1202. Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting.** ASTM C 418. West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces.** ASTM C 779. West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.** ASTM C 944. West Conshohocken, PA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method).** ASTM C 1138. West Conshohocken, PA, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion.** ASTM C 1747. West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.** ASTM C 157. West Conshohocken, PA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage.** ASTM C 1581. West Conshohocken, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (using a steel form insert).** ASTM C 1579. Philadelphia, U.S, 2006d.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete From Ionic Migration Measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; GONZÁLEZ, C. Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation. **Materials and Structures**, v. 33, p. 21-28, 2000.

ANTONI, H. T.; SAEKI, N. Assessment of Chloride Penetration into Fibre Reinforced Concrete under Loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT COMBINATIONS FOR DURABLE CONCRETE, 2005, Dundee, Scotland, UK. **Proceeding...** Dundee: Thomas Telford Services Ltd., 2005. p. 717–724.

ASSIÉ, S.; ESCADEILLAS, G.; WALLER, V. Estimates of self-compacting concrete ‘potential’ durability. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, p. 1909-1917, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado Miúdo - Determinação da Massa específica e Massa específica aparente**. NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da Composição Granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. NBR 9779. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear)**. NBR 15261. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica**. NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. ABNT/NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

BANTHIA, N. **Fiber Reinforced Concrete**. SP-142, Detroit: James I. Daniel e Surendra P. Shah, eds., American Concrete Institute, 1994.

BANTHIA, N.; YAN, C.; MINDESS, S. Restrained Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete: A Novel Test Technique. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 9-14, 1996.

BASHEER, L.; KROPP, J; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2-3, p. 93-103, 2001.

BAYASI, Z.; MCLNTYRE, M. Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 4, p. 337– 344, 2002.

BENTUR, A. MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007.

BINICI, H.; AKSOGAN, O.; GORUR, E.B.; KAPLAN, H.; BODUR, M.N. Hydro-abrasive erosion of concrete incorporating ground blast-furnace slag and ground basaltic pumice. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 804–811, 2009.

BOATING, A.A.; SKEETE, D.H. Incineration of rice hull for use as a cementitious materials; the Guyana experience. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 5, p. 795–802, 1990.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Products and systems for the protection and repair of concrete structure – Test methods – Determination of chloride content in hardened concrete**. BS EN 14629. London, UK, 2007c.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of resistance of capillary absorption**. BS EN 13057. London, UK, 2002a.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Part 4: Determination of shrinkage and expansion**. BS EN 12617-4. London, UK, 2002b.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Testing hardened concrete – Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion**. DD CEN/TS 12390-11. London, UK, 2010.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Testing of concrete – Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory**. BS ISO 1920-8. London, UK, 2009f.

CARMONA FILHO, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil: estudo estatístico. In: JORNADAS EM ESPAÑOL Y PORTUGUÊS SOBRE ESTRUCTURAS Y MATERIALES. Colloquia 88. **Anais...** Madrid, CEDEX, IET, mayo 1988. p.325-348.

CASAGRANDE, E. Q. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante**: Estudo do desempenho em pavimentos de concreto. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

CAVDAR, A.; YETGIN, S. Investigation of abrasion resistance of cement mortar with different pozzolanic compositions and subjected to sulfated medium. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 461–470, 2010.

CEB DESIGN GUIDE. **Durable concrete structures**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1992.

CLAISSE, P. A. **Transport Properties of Concrete**: Measurement and applications. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2014. 312 p.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB-FIP). **Durable Concrete Structures**. CEB Design Code. Bulletin d'information n° 183. London: Thomas Telford Ltd., p. 112, 1992.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). 2014. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_07\\_09\\_09\\_36\\_57\\_10\\_levantamento\\_de\\_graos\\_julho\\_2014.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_07_09_09_36_57_10_levantamento_de_graos_julho_2014.pdf)>. Acesso em: 12 de agosto de 2014.

COOK, D.J.; HINCZAK, I.; JEDY, M.; CAO, H.T. The behavior of Slag Cement Concretes in Marine Environment-Chloride Ion Penetration. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 1989, Norway. **Proceedings of Concrete 3rd International Conference**. Norway: ACI SP-114. p. 1467-1483.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIN, E. M. R. Propriedades de pastas de cimento Portland com adição de cinza da casca de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON 2007. 5p.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261-309.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. 1988. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DE SENSALÉ, G.R.; RIBEIRO, A.B.; GONÇALVES, A. Effects of RHA on autogenous shrinkage of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 892–897, 2008.

DELAGRAVE, A.; MARCHAND, J.; OLLIVIER, J.-P.; JULIEN, S.; HAZRATI, K. Chloride binding capacity of various hydrated cement systems. **Advanced Cement Based Materials**, v. 6, n. 1, p. 28–35, 1997.

E.H. YANG; Y. YANG; V.C. LI. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 6, p. 620–628, 2007.

FIGUEIREDO, A. Concreto com Fibras. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. pp. 1328-1365.

FIGUEIREDO, E. P. Ação dos Cloretos no Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. pp. 887-902.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1675–1683, 2008.

GARCEZ, E. O. **Investigação do Comportamento de Engineered Cementitious Composites Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

GEIKER, M.; GRUBE, H.; LUPING, T.; NILSSON, L.; ANDRADE, C. Laboratory Test Methods. In: KROPP, J.; HILSDORF, H.K. **Performance Criteria for Concrete Durability (Rilem Report, No 12)**. 1. ed. Londres: E&FN Spon, 1995. p. 135-163.

GIVI, A. N.; RASHID, S. A.; NORA, F.; AZIZ, A.; AMRAN, M.; SALLEH, M. Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete: A Review. **Journal of American Science**, v. 6, n. 3, p. 157-165, 2010.

GOPALAN, M. K. Sorptivity of fly ash concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 8, p. 1198-1197, 1996.

GRAEFF, A. G. **Long-term Performance of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete for Pavement Applications**. 2011. Thesis (Doctorate of Philosophy in the Faculty of Engineering) – Centre for Cement and Concrete, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield.

GRAHAM JR. Erosion of concrete in hydraulic structure. Reported by **ACI Committee 210**, ACI manual practice, Part I. 1998.

HABEEB, G.A.; FAYYADH, M.M. Rice husk ash concrete: the effect of RHA average particle size on mechanical properties and drying shrinkage. **Australian Journal of Basic & Applied Sciences**, vol. 3, n. 3, p. 1616–1622, 2009.

HADDAD, R. H.; ASHTEYATE, A. M. Role of Synthetic Fibers in Delaying Steel Corrosion Cracks and Improving Bond with Concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 28, n. 5, p. 787–793, 2001.

HARALD, J. A review of chloride binding in cementitious systems. **Cement and Concrete**, v. 21, p. 1-6, 1998.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em estruturas de concreto armado**. 1993. Tese de Livre Docência – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

HILSDORF, H. K. **Introduction and problem statement**. RILEM – Technical Committee 116-PCD – Performance Criteria for Concrete Durability. Report 12, Bagnaux França, Ed. J Kropp; H. K. Hilsdorf. Londres: E & FN Spon, 1995. p. 1-3.

HORSZCZARUK, E.K. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete. **Wear**, v. 267, n. 1-4, p110–115, 2009.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed., São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed., São Paulo, IBRACON, 2011. 2v.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Efeitos de Altos Teores de Pozolanas em Concretos de Elevado Desempenho sob a Ação de Cloretos**. São Paulo: EPUSP, 1995. 22 p. (Boletim Técnico, BT/PCC/151).

ISAIA, G.C. **Efeito de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho**: um estudo de Durabilidade com Vista à Corrosão da Armadura. 1995. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1995.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). **Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)**. Concrete Engineering Series 82. 2008.

KANDA, T.; LI, V.C. Interface property and apparent strength of a high strength hydrophilic fiber in cement matrix. **Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)**, v. 10, n. 1, p. 5-13, 1998.

KELHAM, S. A water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 143, p. 106-110, June 1988.

KIM, J.K.; KIM, J.S.; HA, G.J., KIM, Y.Y. Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag. **Cement and Concrete Research** v. 37, n. 7, p. 1096–1105, 2007.

KOVLER, K., SIKULER, J. AND BENTUR, A., Free and restrained shrinkage of fibre reinforced concrete with low polypropylene fibre content at early age. In: FIBRE REINFORCED CEMENT AND CONCRETE, 17, 1991, Londres. **Proceedings of The Fourth International Symposium Held by Rilem**. Londres: Ed. R.N. Swamy, 1991. p. 91-101.

KROPP, J.; HILSDORF H. K.; GRUBE, H.; ANDRADE C.; NILSSON, L. Transport Mechanisms and Definitions. In: KROPP, J.; HILSDORF, H.K. **Performance Criteria for Concrete Durability (Rilem Report, No 12)**. 1. ed. Londres: E&FN Spon, 1995. p. 3-9.

LEPECH, M. D., LI, V. C. Long Term Durability Performance of Engineered Cementitious Composites. **Journal of Restoration of Buildings and Monuments**, v. 12, n. 2, p. 119-132, 2006.

LEPECH, M.; LI, V. C. Water permeability of engineered cementitious composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 744-753, 2009.

LEUNG, C. K. Y.; LAI, R.; LEE, A. Y. F. Properties of Wet-Mixed Fiber Reinforced Shotcrete and Fiber Reinforced Concrete with Similar Composition. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 788-795, 2005.

LI, H.; ZHANG, M.H.; OU, J.P. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. **Wear**, v. 260, n. 11-12, p. 1262–1266, 2006.

LI, V. C. ECC — Tailored Composites through Micromechanical Modeling. In: BANTHIA, N.; BENTUR, A.; MUFTI, A. A. **Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future**. Montreal: CSCE, 1998. p. 64-97.

LI, V. C.; LEPECH, M. Engineered cementitious composites: Design, performance and applications. **Ultra-ductile Concrete With Short Fibres – Development, Testing and Applications**, Stuttgart, Germany, pp. 99-120, 2005.

LI, V. Reflections on the research and development of engineered cementitious composites (ECC). In: JCI INTERNATIONAL WORKSHOP ON DUCTILE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES (DFRCC) – APPLICATION AND EVALUATION, 2002, Takayama. **Proceedings...** Takayama, Japan, 2002. p. 1-21.

LI, V.C.; KONG, H.J.; CHAN, Y.W. Development of self-compacting engineered cementitious composites. **Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)**, v. 10, n. 2, p. 66-69, 1998.

LIN, Y.W.; SCOTT, A.; LAWLEY, D.; WOTHERSPOON, L.; INGHAM, J.M. Determining the chloride resistance of ECC shotcrete. In: 9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 2011, Rotorua, New Zealand. **Proceedings...** Rotorua: Khrapko M, Wallevik O., 2011. p. 1-8.

LIU, T. Abrasion Resistace. Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete Making Materials. **ASTM STP 169c**. Eds. Paul Klieger and Joseph F. Lamond. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Material, 1994.

LU, X. Application of the Nernst-Einstein Equation to Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 293-302, 1997.

LUI, YW. Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 5, p. 972-977, 2007.

MAGALHÃES, M. S. **Caracterização Experimental de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de PVA: processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica**. 2010. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P.K. Rice Husk Ash – A unique supplementary cementing material. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY (CANMET), 1992, Greece. **Proceedings...** Greece: Malhotra VM, 1992. p. 407–431.

MINDESS, S.; ODLER, I.; SKALNY, J. Significance to concrete performance of interfaces and bond challenges of the future. In: 8TH INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 1., 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Finep, 1986. p. 151-157.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc., 1981, 644 p.

NAAMAN, A. E. Development and Evolution of Tensile Strain-Hardening FRC Composites. In: SEVENTH RILEM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIBRE REINFORCED CONCRETE: DESIGN AND APPLICATIONS (BEFIB), 1., 2008, Indian. **Proceedings...** 2008. p. 1-28.

NAAMAN, A. E. Strain Hardening and Deflection Hardening Fiber Reinforced Cement Composites. In: FOURTH INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP – HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CEMENT COMPOSITES (HPRFRC4), 2003, USA. **Proceedings...** 2003. p. 95-113.

NAAMAN, A. E. Toughness, ductility, surface energy and deflection-hardening FRC composites. In: PROCEEDINGS OF THE JCI INTERNATIONAL WORKSHOP ON DUCTILE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES (DFRCC) – APPLICATION AND EVALUATION. **Japan Concrete Institute**. 2002. P. 33-57.

NAAMAN, A. E., REINHARDT, H. W. Proposed Classification of FRC Composites Based on their Tensile Response. **Materials and Structures**, v. 39, p. 547–555. Also In: PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM HONORING S. MINDESS, N. BANTHIA, 2006, Canada. **Electronic proceedings**. Canada: University of British Columbia, 2006. 13 p.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 4. ed. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2003.

NGUYEN, V.T. **Rice husk ash as a mineral admixture for ultra high performance concrete**. 2011. Ph.D. Thesis, Delft University, The Netherlands.

NILSSON, L.-O.; POULSEN, E.; SANDBERG, P.; SORENSEN, H.E.; KLINGHOFFER, O. **HETEK, Chloride penetration into concrete, State-of-the-art, transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models**. ed. 53. Copenhagen: Road Directorate, 1996. 151 p.

ODRIOZOLA, M. A. B.; GUTIERREZ, P. A. Comparative study of different test methods for reinforced concrete durability assessment in marine environment. **Materials and Structures**, v. 41, n. 3, p. 527-541, 2008.

PARDON, I.; ZOLLO, R.F. Effect of synthetic fibres on volume stability and cracking of portland cement concrete and mortar. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 4, p. 327–332, 1990.

PINTO JR. **Análise do desempenho de concretos incorporando baixos teores de fibras de polipropileno, nylon e poliéster**. Universidade Estadual de Campinas: Laboratório de Estruturas e Construção Civil, 2001. 48p. (Relatório de Ensaios Tecnológicos).

QI, C.; WEISS, W.J.; OLEK, J. Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber-reinforced concrete using semi-automated image analysis. **Concrete Science and Engineering Journal**, v. 36, n. 260, p. 386– 395, 2003.

REDA, M.M.; SHRIVE, N.G.; GILLOTE, J.E. Microstructural investigation of innovative UHPC. **Cement and Concrete Research**. n. 29, p. 323-329. 1999.

REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCTIONS (RILEM). **Test Method II.4: Water absorption tube test**, 2006.

RILEM TC 116-PCD. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. **Materials and Structures**, v. 32, n. 217, p. 163-173, 1999.

RIZWAN, S.A. **High-performance mortars and concretes using secondary raw materials**. 2006. Ph.D. Thesis, Faculty of Maschinenbau, Verfahrens-und Energietechnik der Technischen Bergakademie Freiberg, Germany, 2006.

ROQUE, R.; KIM, N.; KIM, B.; LOPP, G. **Durability of Fiber-reinforced Concrete in Florida Environments**. Gainesville: University of Florida – Department of Civil and Coastal Engineering, 2009. 255 p. (Technical Report).

SADEGZADEH, M.; KETTLE, R.; VASSOU, V. The influence of glass, polypropylene and steel fibers on the physical properties of concrete. **Concrete**, v. 35, p. 12-22, 2001.

SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; LI, V. C. Internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 10, p. 893-901, 2009.

SAHMARAN, M.; LI, M.; LI, V.C. Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 6, p. 604-611. 2007.

SAHMARAN, M.; LI, V. Engineered Cementitious Composites: An Innovative Concrete for Durable Structure. In: ASCE STRUCTURE CONGRESS, 2009, Austin. **Proceedings...** Austin: American Society of Civil Engineers, 2009. p. 2219-2231.

SAHMARAN, M.; LI, V. Engineered Cementitious Composites: Can Composites Be Accepted as Crack-Free Concrete? **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2164, p. 1-8, 2010.

SANJUAN, M. A.; ANDRADE, C.; BENTUR, A. Effect of Crack Control in Mortars Containing Polypropylene Fibers on the Corrosion of Steel in a Cementitious Matrix. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 2, p. 134–141, 1997.

SARASWATHY, V.; HA-WON, S. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**. v. 21, n. 8, p. 1779–1784, 2007.

SARASWATHY, V.; SONG. H. W. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 8, p. 1779-1784, 2007.

SAVAS, B.Z. **Effects of microstructure on durability of concrete**. 1999. PhD Thesis – North Carolina State University, Raleigh, NC.

SAVASTANO JR, H.; AGOPYAN, V. Transition zone of hardened cement paste and vegetable fibres. In: 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF FIBRE REINFORCED

CEMENT AND CONCRETE, 1., 1992, Sheffield. **Proceedings...** Londres: E&FN Spon, 1992. p. 1110-1119.

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

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 537-545, 2004.

SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 95, p. 389-394, 1998.

SHI, X.; XIE, N.; FORTUNE, K.; GONG, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 125-138, 2012.

SILVA, T. J. Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 809-847.

SOROUSHIAN, P.; LEE, C-D. Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 5, p. 433-439, 1990.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998. 262 p.

STANG, H.; AARRE, T. Evaluation of crack width in FRC with conventional reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, v. 14, n. 2, p. 143–154, 1992.

STANISH, K.D.; HOOTON, R.D.; THOMAS, M.D.A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review**. 1997. Toronto, Canada. University of Toronto. 33 p. Notas de aula.

TALERO, R.; TRUSILEWICZ, L.; DELGADO, A.; PEDRAJAS, C.; LANNEGRAND, R.; RAHHAL, V. Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating

from pozzolan and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2370-2380, 2011.

TOUTANJI, H.; MCNEIL, S.; BAYASI, Z. Chloride Permeability and Impact Resistance of Polypropylene-Fiber-Reinforced Silica Fume Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 7, p. 961–968, 1998.

TREJO, D.; PILLAI, R. G. Accelerated chloride threshold testing: Part I – ASTM A615 and ASTM A706 reinforcement. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 6, p. 519-527, 2003.

TSUKAMOTO M. Tightness of fiber concrete. **Darmstadt Concrete: Annual Journal on Concrete and Concrete Structures**, v. 5, p. 215–225, 1990.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. CBI Forskning 82:4. Estocolmo: Swedish Cement and Concrete Research Institute / CBI, Cement och betonginstitutet, 1982. 469 p.

UEDA, T; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specification for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. **Structural Engineering International**, v. 17, n. 4, p. 359-366, 2007.

UJI, K.; MATSUOKA, Y.; AND MARUYA, T. Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete due to Permeation of Chloride. **Corrosion of Reinforcement in Concrete**, Society of Chemical Industry, London, UK, 1990, p. 258-267.

WANG, K.; SHAH, S. P.; PHUAKSUK, P. Plastic shrinkage cracking in concrete materials – influence of fly ash and fibers. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 458-464, 2001.

WANG, S.; LI, V.C. Engineered Cementitious Composites with high-volume fly ash. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 3, p. 233–241, 2007.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 2, p. 221-232, 2000.

WU, C. **Micromechanical tailoring of PVA-ECC for structural applications**. 2000. PhD Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor.

YEN, T.; HSU, T.H.; LUI, Y.W.; CHEN, S.H. Influence of class F ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 458–463, 2007.

ZHANG, J.; GAO, Y.; WANG, Z. Evaluation of shrinkage induced cracking performance of low shrinkage engineered cementitious composite by ring tests. **Composites Part B: Engineering**, v. 52, p. 21–29, 2013.

ZHANG, J.; LI, V.C. Influencing of supporting base characteristics on shrinkage-induced stresses in concrete pavements. **Journal of Transportation Engineering**, v. 127, n. 6, p. 455-462, 2001.

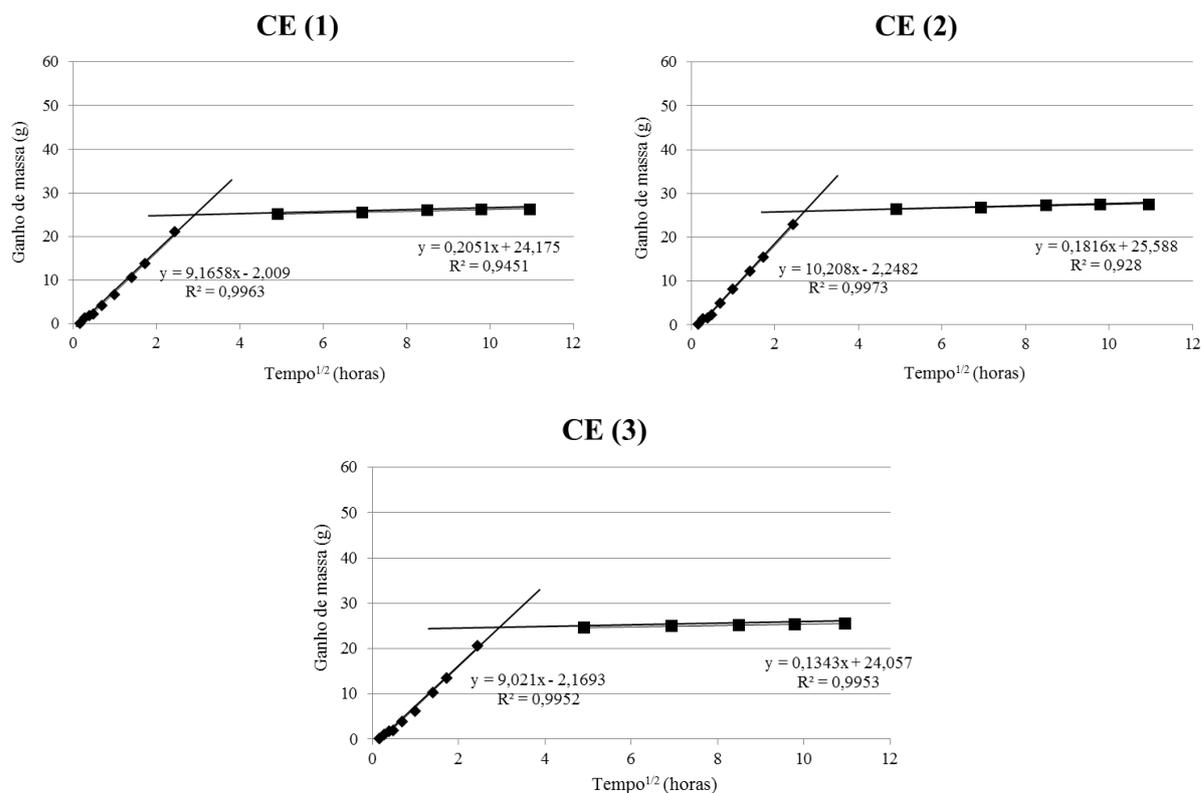
ZHANG, M.-H.; GJORV, O.E. Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 4, p. 610-618, 1990.

ZHANG, M.-H.; LI, H. The Resistance to Chloride Penetration of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement. **Testing, Reliability, and Application of Microand Nano-Material Systems IV**, v. 6175, SPIE, San Diego, CA, p. 1–8, 2006.

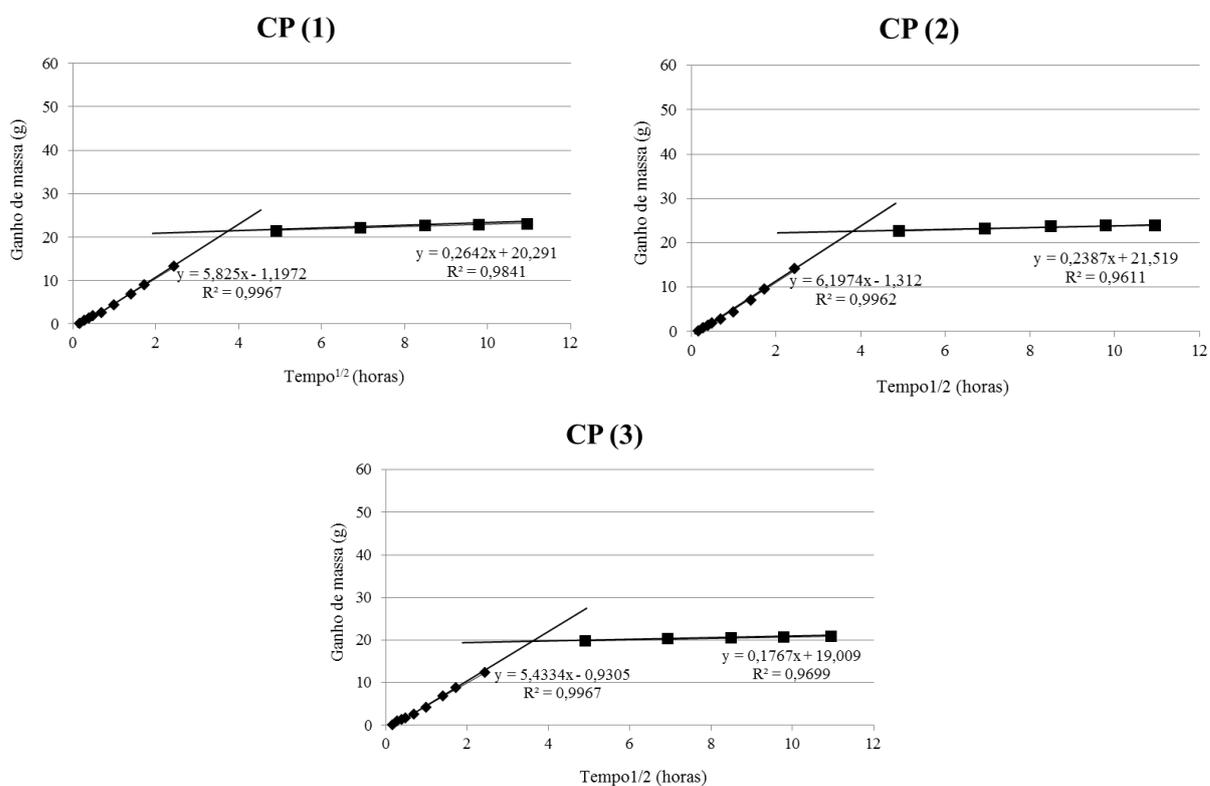
ZHU, Y.; ZHANG, Z.; YANG, Y.; YAO, Y. Measurement and correlation of ductility and compressive strength for engineered cementitious composites (ECC) produced by binary and ternary systems of binder materials: Fly ash, slag, silica fume and cement. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 192-198, 2014.

**APÊNDICE A – Valores de ganho de massa em função do tempo – Ensaio  
de Absortividade**

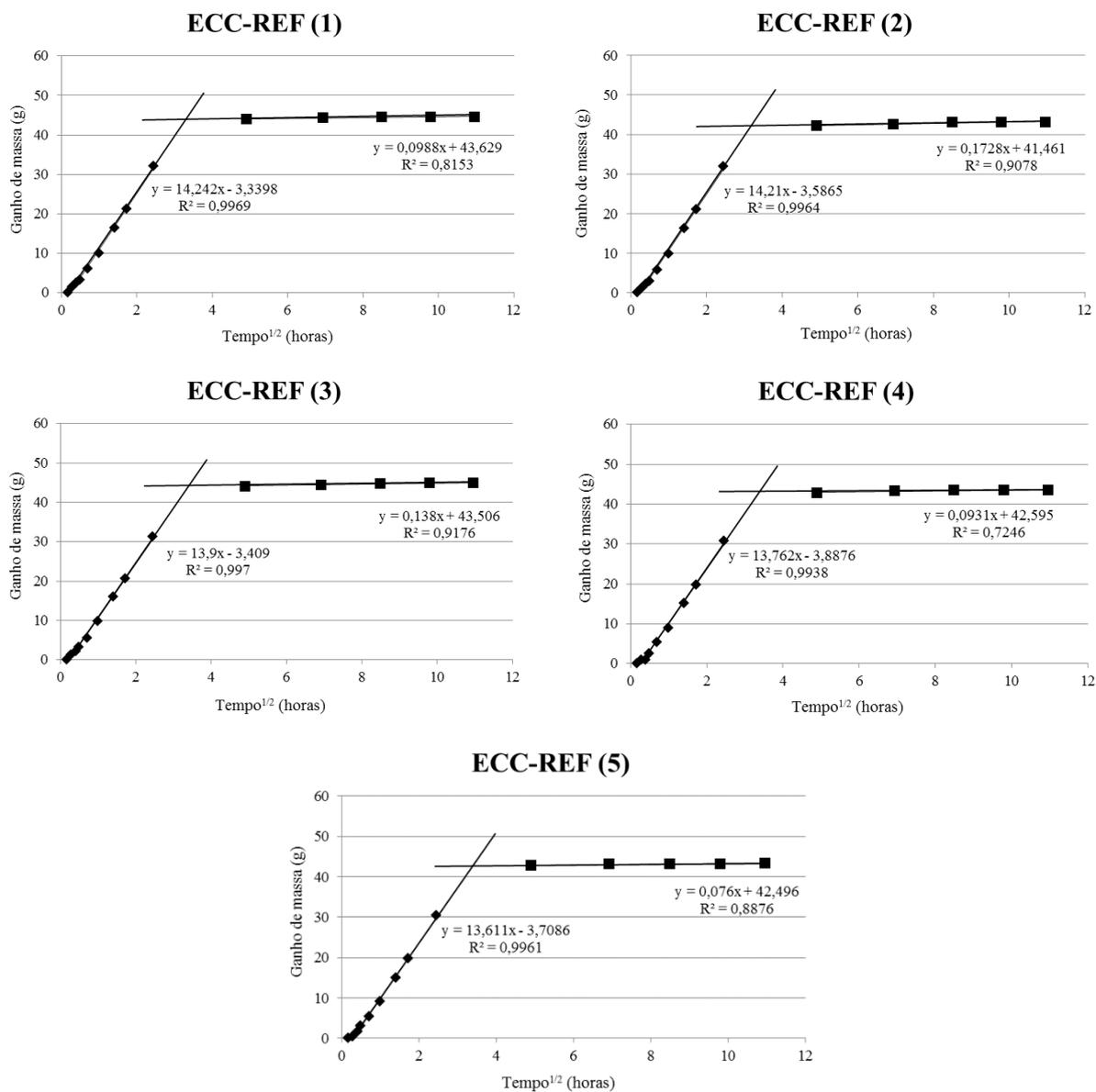
## a) Concreto Estrutural (CE)



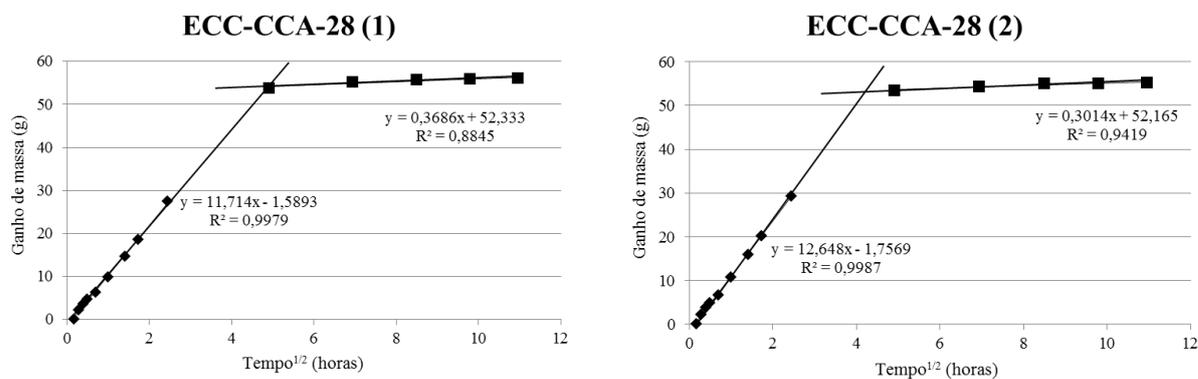
## b) Concreto Pavimento (CP)

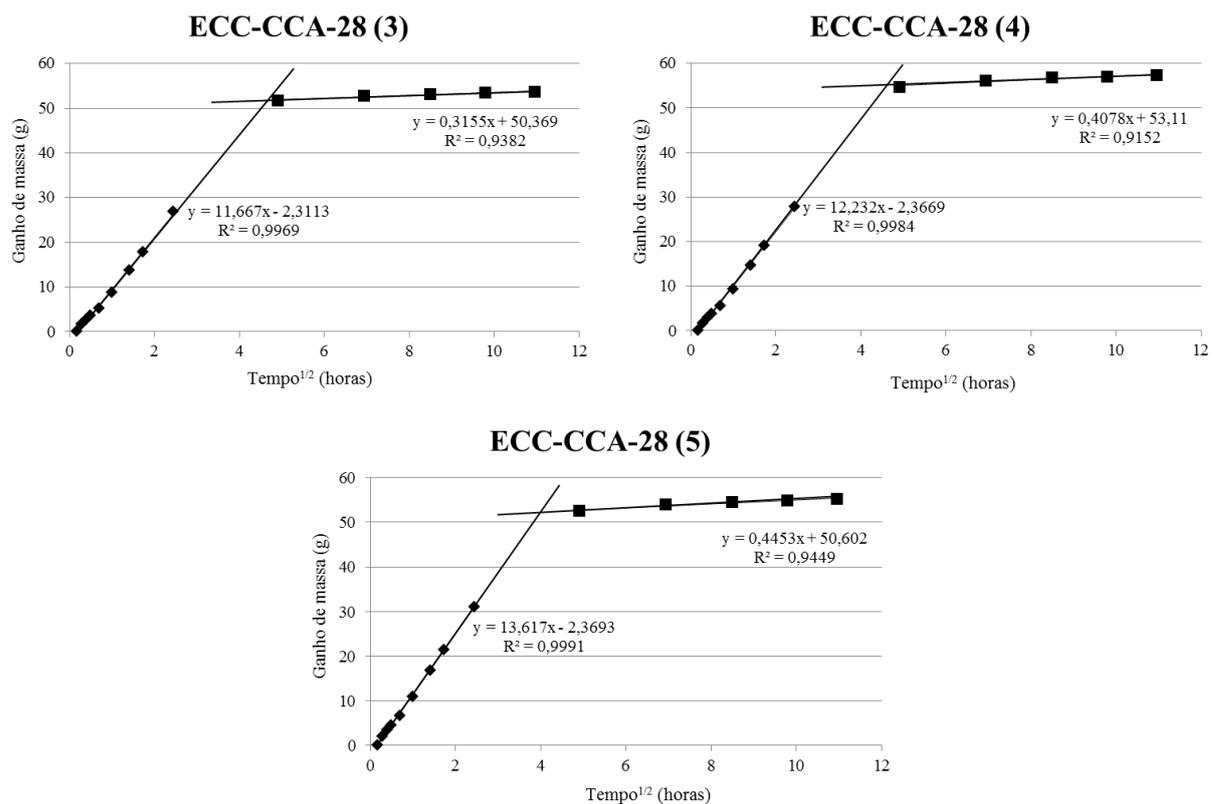


## c) Compósito de referência (ECC-REF)

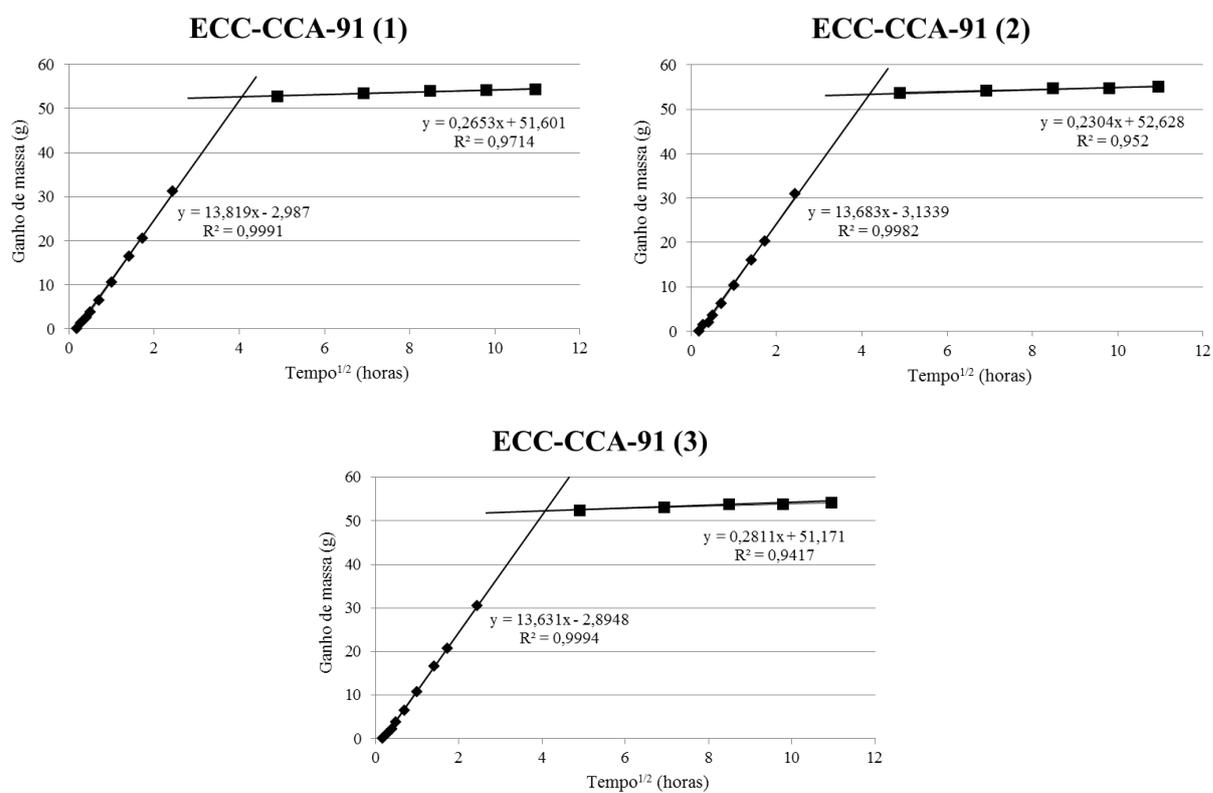


## d) Compósito com cinza – 28 dias (ECC-CCA-28)





e) Compósito com cinza – 91 dias (ECC-CCA-91)



**APÊNDICE B – Resultados da taxa de absorção e resistência capilar –  
Ensaio de Absortividade**

| <b>Concreto Estrutural (CE)</b> |   |   |
|---------------------------------|---|---|
| <b>Corpo de prova</b>           | <b>Taxa Abs (g/cm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>) x 10<sup>-2</sup></b> | <b>Resis. Capilar (h/m<sup>2</sup>)</b> |
| 1                               | 11,67   | 4675                                    |
| 2                               | 13,00   | 4442                                    |
| 3                               | 11,49   | 4722                                    |
| <b>Média</b>                    | <b>12,05</b>  | <b>4613</b>                             |
| <b>SD</b>                       | <b>0,82</b>   | <b>150</b>                              |
| <b>CV</b>                       | <b>6,84%</b>  | <b>3,25%</b>                            |

| <b>Concreto Pavimento (CP)</b> |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| <b>Corpo de prova</b>          | <b>Taxa Abs (g/cm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>) x 10<sup>-2</sup></b> | <b>Resis. Capilar (h/m<sup>2</sup>)</b> |
| 1                              | 7,42  | 6183                                    |
| 2                              | 7,89  | 6130                                    |
| 3                              | 6,92  | 6069                                    |
| <b>Média</b>                   | <b>7,41</b>   | <b>6127</b>                             |
| <b>SD</b>                      | <b>0,49</b>   | <b>57</b>                               |
| <b>CV</b>                      | <b>6,57%</b>  | <b>0,93%</b>                            |

| <b>Compósito de referência (ECC-REF)</b> |   |   |
|--|---|---|
| <b>Corpo de prova</b>                    | <b>Taxa Abs (g/cm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>) x 10<sup>-2</sup></b> | <b>Resis. Capilar (h/m<sup>2</sup>)</b> |
| 1  | 18,13   | 5314                                    |
| 2  | 18,09   | 5135                                    |
| 3  | 17,70   | 5454                                    |
| 4  | 17,52   | 5441                                    |
| 5  | 17,33   | 5462                                    |
| <b>Média</b>                             | <b>17,76</b>  | <b>5361</b>                             |
| <b>SD</b>                                | <b>0,35</b>   | <b>140</b>                              |
| <b>CV</b>                                | <b>1,98%</b>  | <b>2,62%</b>                            |

| <b>Compósito com cinza – 28 dias (ECC-CCA-28)</b> |   |   |
|---|---|---|
| <b>Corpo de prova</b>                             | <b>Taxa Abs (g/cm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>) x 10<sup>-2</sup></b> | <b>Resis. Capilar (h/m<sup>2</sup>)</b> |
| 1   | 14,91   | 7604                                    |
| 2   | 16,10   | 6988                                    |
| 3   | 14,85   | 7425                                    |
| 4   | 15,57   | 7507                                    |
| 5   | 17,34   | 6435                                    |
| <b>Média</b>                                      | <b>15,76</b>  | <b>7192</b>                             |
| <b>SD</b>   | <b>1,02</b>   | <b>485</b>                              |
| <b>CV</b>   | <b>6,48%</b>  | <b>6,74%</b>                            |

| <b>Compósito com cinza – 91 dias (ECC-CCA-91)</b> |   |   |
|---|---|---|
| <b>Corpo de prova</b>                             | <b>Taxa Abs (g/cm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>) x 10<sup>-2</sup></b> | <b>Resis. Capilar (h/m<sup>2</sup>)</b> |
| 1   | 17,59   | 6444                                    |
| 2   | 17,42   | 6632                                    |
| 3   | 17,36   | 6480                                    |
| <b>Média</b>                                      | <b>17,46</b>  | <b>6519</b>                             |
| <b>SD</b>   | <b>0,12</b>   | <b>100</b>                              |
| <b>CV</b>   | <b>0,71%</b>  | <b>1,53%</b>                            |

## **APÊNDICE C – Resultados de Absorção e Índice de vazios**

| <b>Absorção (%)</b>       |                       |          |          |              |             |              |
|---------------------------|-----------------------|----------|----------|--------------|-------------|--------------|
| <b>Concreto/Compósito</b> | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <i>Média</i> | <i>SD</i>   | <i>CV</i>    |
|                           | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |              |             |              |
| CE                        | 6,10                  | 5,97     | 6,15     | <b>6,07</b>  | <b>0,10</b> | <b>1,59%</b> |
| CP                        | 3,06                  | 3,05     | 2,88     | <b>3,00</b>  | <b>0,10</b> | <b>3,28%</b> |
| ECC-REF                   | 9,99                  | 9,85     | 11,05    | <b>10,30</b> | <b>0,66</b> | <b>6,37%</b> |
| ECC-CCA-28                | 16,95                 | 14,63    | 15,93    | <b>15,84</b> | <b>1,16</b> | <b>7,32%</b> |
| ECC-CCA-91                | 15,75                 | 16,40    | 16,08    | <b>16,08</b> | <b>0,32</b> | <b>2,00%</b> |

| <b>Índice de Vazios (%)</b> |                       |          |          |              |             |              |
|-----------------------------|-----------------------|----------|----------|--------------|-------------|--------------|
| <b>Concreto/Compósito</b>   | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <i>Média</i> | <i>SD</i>   | <i>CV</i>    |
|                             | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |              |             |              |
| CE                          | 14,22                 | 13,97    | 14,29    | <b>14,16</b> | <b>0,17</b> | <b>1,19%</b> |
| CP                          | 7,11                  | 7,04     | 6,72     | <b>6,96</b>  | <b>0,20</b> | <b>2,93%</b> |
| ECC-REF                     | 19,36                 | 19,24    | 21,44    | <b>20,01</b> | <b>1,24</b> | <b>6,19%</b> |
| ECC-CCA-28                  | 29,55                 | 25,89    | 27,98    | <b>27,81</b> | <b>1,83</b> | <b>6,60%</b> |
| ECC-CCA-91                  | 28,36                 | 29,34    | 28,78    | <b>28,83</b> | <b>0,49</b> | <b>1,71%</b> |

## **APÊNDICE D – Resultados de Absorção por capilaridade**

| <b>Concreto Estrutural (CE)</b>                        |                      |              |              |              |              |              |              |
|--|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Coefficiente de capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b> |                      |              |              |              |              |              |              |
| <b>Corpo de prova</b>                                  | <b>Tempo (horas)</b> |              |              |              |              |              |              |
|  | <b>0h</b>            | <b>3h</b>    | <b>6h</b>    | <b>24h</b>   | <b>48h</b>   | <b>72h</b>   | <b>96h</b>   |
| <b>1</b>   | 0,000                | 0,306        | 0,421        | 0,856        | 1,076        | 1,192        | 1,268        |
| <b>2</b>   | 0,000                | 0,318        | 0,421        | 0,819        | 1,025        | 1,110        | 1,166        |
| <b>3</b>   | 0,000                | 0,297        | 0,405        | 0,824        | 1,045        | 1,156        | 1,236        |
| <b>Média</b>   | <b>0,000</b>         | <b>0,307</b> | <b>0,416</b> | <b>0,833</b> | <b>1,049</b> | <b>1,153</b> | <b>1,224</b> |
| <b>SD</b>  | <b>0,000</b>         | <b>0,011</b> | <b>0,010</b> | <b>0,020</b> | <b>0,026</b> | <b>0,041</b> | <b>0,052</b> |
| <b>CV</b>  | -                    | <b>3,55%</b> | <b>2,30%</b> | <b>2,40%</b> | <b>2,44%</b> | <b>3,54%</b> | <b>4,26%</b> |

| <b>Concreto Pavimento (CP)</b>                         |                      |               |               |               |               |               |               |
|--|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Coefficiente de capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b> |                      |               |               |               |               |               |               |
| <b>Corpo de prova</b>                                  | <b>Tempo (horas)</b> |               |               |               |               |               |               |
|  | <b>0h</b>            | <b>3h</b>     | <b>6h</b>     | <b>24h</b>    | <b>48h</b>    | <b>72h</b>    | <b>96h</b>    |
| <b>1</b>   | 0,000                | 0,015         | 0,023         | 0,080         | 0,120         | 0,150         | 0,174         |
| <b>2</b>   | 0,000                | 0,023         | 0,029         | 0,090         | 0,135         | 0,168         | 0,194         |
| <b>3</b>   | 0,000                | 0,022         | 0,032         | 0,102         | 0,153         | 0,190         | 0,218         |
| <b>Média</b>   | <b>0,000</b>         | <b>0,020</b>  | <b>0,028</b>  | <b>0,091</b>  | <b>0,136</b>  | <b>0,169</b>  | <b>0,195</b>  |
| <b>SD</b>  | <b>0,000</b>         | <b>0,004</b>  | <b>0,005</b>  | <b>0,011</b>  | <b>0,017</b>  | <b>0,020</b>  | <b>0,022</b>  |
| <b>CV</b>  | -                    | <b>20,52%</b> | <b>16,39%</b> | <b>11,92%</b> | <b>12,20%</b> | <b>11,67%</b> | <b>11,11%</b> |

| <b>Compósito de referência (ECC-REF)</b>               |                      |              |              |              |              |              |              |
|--|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Coefficiente de capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b> |                      |              |              |              |              |              |              |
| <b>Corpo de prova</b>                                  | <b>Tempo (horas)</b> |              |              |              |              |              |              |
|  | <b>0h</b>            | <b>3h</b>    | <b>6h</b>    | <b>24h</b>   | <b>48h</b>   | <b>72h</b>   | <b>96h</b>   |
| <b>1</b>   | 0,000                | 0,461        | 0,609        | 1,131        | 1,409        | 1,595        | 1,744        |
| <b>2</b>   | 0,000                | 0,519        | 0,666        | 1,169        | 1,413        | 1,598        | 1,721        |
| <b>3</b>   | 0,000                | 0,453        | 0,624        | 1,272        | 1,589        | 1,786        | 1,940        |
| <b>Média</b>   | <b>0,000</b>         | <b>0,478</b> | <b>0,633</b> | <b>1,190</b> | <b>1,471</b> | <b>1,660</b> | <b>1,802</b> |
| <b>SD</b>  | <b>0,000</b>         | <b>0,036</b> | <b>0,030</b> | <b>0,073</b> | <b>0,103</b> | <b>0,110</b> | <b>0,120</b> |
| <b>CV</b>  | -                    | <b>7,58%</b> | <b>4,69%</b> | <b>6,14%</b> | <b>6,97%</b> | <b>6,60%</b> | <b>6,68%</b> |

| <b>Compósito com cinza – 28 dias (ECC-CCA-28)</b>      |                      |               |               |               |               |               |               |
|--|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Coefficiente de capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b> |                      |               |               |               |               |               |               |
| <b>Corpo de prova</b>                                  | <b>Tempo (horas)</b> |               |               |               |               |               |               |
|  | <b>0h</b>            | <b>3h</b>     | <b>6h</b>     | <b>24h</b>    | <b>48h</b>    | <b>72h</b>    | <b>96h</b>    |
| <b>1</b>   | 0,000                | 0,033         | 0,046         | 0,146         | 0,224         | 0,286         | 0,339         |
| <b>2</b>   | 0,000                | 0,065         | 0,103         | 0,308         | 0,448         | 0,560         | 0,652         |
| <b>3</b>   | 0,000                | 0,042         | 0,065         | 0,227         | 0,348         | 0,444         | 0,525         |
| <b>Média</b>   | <b>0,000</b>         | <b>0,047</b>  | <b>0,071</b>  | <b>0,227</b>  | <b>0,340</b>  | <b>0,430</b>  | <b>0,505</b>  |
| <b>SD</b>  | <b>0,000</b>         | <b>0,016</b>  | <b>0,029</b>  | <b>0,081</b>  | <b>0,112</b>  | <b>0,137</b>  | <b>0,158</b>  |
| <b>CV</b>  | <b>-</b>             | <b>35,17%</b> | <b>40,92%</b> | <b>35,61%</b> | <b>33,02%</b> | <b>31,93%</b> | <b>31,19%</b> |

| <b>Compósito com cinza – 91 dias (ECC-CCA-91)</b>      |                      |              |               |               |               |               |               |
|--|----------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Coefficiente de capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b> |                      |              |               |               |               |               |               |
| <b>Corpo de prova</b>                                  | <b>Tempo (horas)</b> |              |               |               |               |               |               |
|  | <b>0h</b>            | <b>3h</b>    | <b>6h</b>     | <b>24h</b>    | <b>48h</b>    | <b>72h</b>    | <b>96h</b>    |
| <b>1</b>   | 0,000                | 0,037        | 0,060         | 0,238         | 0,281         | 0,388         | 0,458         |
| <b>2</b>   | 0,000                | 0,037        | 0,060         | 0,275         | 0,341         | 0,481         | 0,570         |
| <b>3</b>   | 0,000                | 0,032        | 0,050         | 0,192         | 0,220         | 0,314         | 0,383         |
| <b>Média</b>   | <b>0,000</b>         | <b>0,035</b> | <b>0,056</b>  | <b>0,235</b>  | <b>0,281</b>  | <b>0,395</b>  | <b>0,471</b>  |
| <b>SD</b>  | <b>0,000</b>         | <b>0,003</b> | <b>0,006</b>  | <b>0,041</b>  | <b>0,060</b>  | <b>0,084</b>  | <b>0,094</b>  |
| <b>CV</b>  | <b>-</b>             | <b>8,35%</b> | <b>10,42%</b> | <b>17,63%</b> | <b>21,53%</b> | <b>21,18%</b> | <b>20,01%</b> |

## **APÊNDICE E – Resultados de Absorção de pelo método do Cachimbo**

| <b>Concreto Estrutural (CE)</b>     |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Altura da coluna d'água (ml)</b> |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Corpo de prova</b>               | <b>Tempo (minutos)</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|                                     | <b>2</b>               | <b>5</b>    | <b>10</b>   | <b>15</b>   | <b>30</b>   | <b>45</b>   | <b>60</b>   | <b>75</b>   | <b>90</b>   | <b>105</b>  | <b>120</b>  |
| <b>1</b>                            | 0,20                   | 0,30        | 0,40        | 0,40        | 0,45        | 0,50        | 0,60        | 0,60        | 0,65        | 0,70        | 0,75        |
| <b>2</b>                            | 0,20                   | 0,30        | 0,30        | 0,40        | 0,40        | 0,40        | 0,45        | 0,45        | 0,50        | 0,50        | 0,55        |
| <b>3</b>                            | 0,10                   | 0,20        | 0,30        | 0,40        | 0,40        | 0,45        | 0,50        | 0,60        | 0,60        | 0,60        | 0,65        |
| <b>Média</b>                        | <b>0,17</b>            | <b>0,27</b> | <b>0,33</b> | <b>0,40</b> | <b>0,42</b> | <b>0,45</b> | <b>0,52</b> | <b>0,55</b> | <b>0,58</b> | <b>0,60</b> | <b>0,65</b> |
| <b>SD</b>                           | <b>0,06</b>            | <b>0,06</b> | <b>0,06</b> | <b>0,00</b> | <b>0,03</b> | <b>0,05</b> | <b>0,08</b> | <b>0,09</b> | <b>0,08</b> | <b>0,10</b> | <b>0,10</b> |

| <b>Concreto Pavimento (CP)</b>      |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Altura da coluna d'água (ml)</b> |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Corpo de prova</b>               | <b>Tempo (minutos)</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|                                     | <b>2</b>               | <b>5</b>    | <b>10</b>   | <b>15</b>   | <b>30</b>   | <b>45</b>   | <b>60</b>   | <b>75</b>   | <b>90</b>   | <b>105</b>  | <b>120</b>  |
| <b>1</b>                            | 0,00                   | 0,00        | 0,00        | 0,01        | 0,10        | 0,15        | 0,20        | 0,25        | 0,30        | 0,30        | 0,35        |
| <b>2</b>                            | 0,10                   | 0,18        | 0,18        | 0,20        | 0,20        | 0,20        | 0,25        | 0,30        | 0,30        | 0,30        | 0,30        |
| <b>3</b>                            | 0,00                   | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,05        | 0,10        | 0,10        | 0,15        | 0,18        |
| <b>Média</b>                        | <b>0,03</b>            | <b>0,06</b> | <b>0,06</b> | <b>0,07</b> | <b>0,10</b> | <b>0,12</b> | <b>0,17</b> | <b>0,22</b> | <b>0,23</b> | <b>0,25</b> | <b>0,28</b> |
| <b>SD</b>                           | <b>0,06</b>            | <b>0,10</b> | <b>0,10</b> | <b>0,11</b> | <b>0,10</b> | <b>0,10</b> | <b>0,10</b> | <b>0,10</b> | <b>0,12</b> | <b>0,09</b> | <b>0,09</b> |

| <b>Compósito de referência (ECC-REF)</b> |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|--|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Altura da coluna d'água (ml)</b>      |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Corpo de prova</b>                    | <b>Tempo (minutos)</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|  | <b>2</b>               | <b>5</b>    | <b>10</b>   | <b>15</b>   | <b>30</b>   | <b>45</b>   | <b>60</b>   | <b>75</b>   | <b>90</b>   | <b>105</b>  | <b>120</b>  |
| <b>1</b>                                 | 0,00                   | 0,10        | 0,20        | 0,20        | 0,25        | 0,30        | 0,30        | 0,35        | 0,40        | 0,40        | 0,40        |
| <b>2</b>                                 | 0,00                   | 0,05        | 0,10        | 0,10        | 0,20        | 0,20        | 0,25        | 0,30        | 0,30        | 0,40        | 0,40        |
| <b>Média</b>                             | <b>0,00</b>            | <b>0,08</b> | <b>0,15</b> | <b>0,15</b> | <b>0,23</b> | <b>0,25</b> | <b>0,28</b> | <b>0,33</b> | <b>0,35</b> | <b>0,40</b> | <b>0,40</b> |
| <b>SD</b>                                | <b>0,00</b>            | <b>0,04</b> | <b>0,07</b> | <b>0,07</b> | <b>0,04</b> | <b>0,07</b> | <b>0,04</b> | <b>0,04</b> | <b>0,07</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> |

| <b>Compósito com cinza - 28 dias (ECC-CCA-28)</b> |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|---|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Altura da coluna d'água (ml)</b>               |                        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Corpo de prova</b>                             | <b>Tempo (minutos)</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|   | <b>2</b>               | <b>5</b>    | <b>10</b>   | <b>15</b>   | <b>30</b>   | <b>45</b>   | <b>60</b>   | <b>75</b>   | <b>90</b>   | <b>105</b>  | <b>120</b>  |
| <b>1</b>  | 0,05                   | 0,10        | 0,18        | 0,20        | 0,20        | 0,20        | 0,25        | 0,30        | 0,30        | 0,35        | 0,38        |
| <b>2</b>  | 0,05                   | 0,10        | 0,18        | 0,20        | 0,20        | 0,20        | 0,25        | 0,30        | 0,30        | 0,30        | 0,35        |
| <b>Média</b>                                      | <b>0,05</b>            | <b>0,10</b> | <b>0,18</b> | <b>0,20</b> | <b>0,20</b> | <b>0,20</b> | <b>0,25</b> | <b>0,30</b> | <b>0,30</b> | <b>0,33</b> | <b>0,37</b> |
| <b>SD</b>   | <b>0,00</b>            | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,04</b> | <b>0,02</b> |

| <b>Compósito com cinza - 91 dias (ECC-CCA-91)</b> |                        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|---|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Altura da coluna d'água (ml)</b>               |                        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Corpo de prova</b>                             | <b>Tempo (minutos)</b> |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|   | <b>2</b>               | <b>5</b>           | <b>10</b>          | <b>15</b>          | <b>30</b>          | <b>45</b>          | <b>60</b>          | <b>75</b>          | <b>90</b>          | <b>105</b>         | <b>120</b>         |
| <b>1</b>  | 0,00                   | 0,10               | 0,20               | 0,20               | 0,20               | 0,20               | 0,25               | 0,30               | 0,30               | 0,35               | 0,38               |
| <b>2</b>  | 0,10                   | 0,20               | 0,20               | 0,30               | 0,30               | 0,30               | 0,35               | 0,40               | 0,40               | 0,40               | 0,40               |
| <b><i>Média</i></b>                               | <b><i>0,05</i></b>     | <b><i>0,15</i></b> | <b><i>0,20</i></b> | <b><i>0,25</i></b> | <b><i>0,25</i></b> | <b><i>0,25</i></b> | <b><i>0,30</i></b> | <b><i>0,35</i></b> | <b><i>0,35</i></b> | <b><i>0,38</i></b> | <b><i>0,39</i></b> |
| <b><i>SD</i></b>                                  | <b><i>0,07</i></b>     | <b><i>0,07</i></b> | <b><i>0,00</i></b> | <b><i>0,07</i></b> | <b><i>0,07</i></b> | <b><i>0,07</i></b> | <b><i>0,07</i></b> | <b><i>0,07</i></b> | <b><i>0,07</i></b> | <b><i>0,04</i></b> | <b><i>0,01</i></b> |

**APÊNDICE F – Resultados do Ensaio de Penetração de íons cloretos –  
Correntes e cargas elétricas**

| <b>Concreto Estrutural (CE)</b> |                       |          |          |              |              |               |
|---------------------------------|-----------------------|----------|----------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Corrente (A)</b>             |                       |          |          |              |              |               |
| <b>Tempo (min)</b>              | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b> | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|                                 | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |              |              |               |
| <b>0</b>                        | 0,15                  | 0,16     | 0,14     | <b>0,15</b>  | <b>0,010</b> | <b>6,67%</b>  |
| <b>30</b>                       | 0,18                  | 0,19     | 0,16     | <b>0,18</b>  | <b>0,015</b> | <b>8,65%</b>  |
| <b>60</b>                       | 0,19                  | 0,21     | 0,18     | <b>0,19</b>  | <b>0,015</b> | <b>7,90%</b>  |
| <b>90</b>                       | 0,2                   | 0,23     | 0,19     | <b>0,21</b>  | <b>0,021</b> | <b>10,07%</b> |
| <b>120</b>                      | 0,22                  | 0,25     | 0,2      | <b>0,22</b>  | <b>0,025</b> | <b>11,27%</b> |
| <b>150</b>                      | 0,23                  | 0,26     | 0,21     | <b>0,23</b>  | <b>0,025</b> | <b>10,79%</b> |
| <b>180</b>                      | 0,24                  | 0,27     | 0,22     | <b>0,24</b>  | <b>0,025</b> | <b>10,34%</b> |
| <b>210</b>                      | 0,25                  | 0,28     | 0,22     | <b>0,25</b>  | <b>0,030</b> | <b>12,00%</b> |
| <b>240</b>                      | 0,25                  | 0,28     | 0,23     | <b>0,25</b>  | <b>0,025</b> | <b>9,93%</b>  |
| <b>270</b>                      | 0,25                  | 0,29     | 0,23     | <b>0,26</b>  | <b>0,031</b> | <b>11,90%</b> |
| <b>300</b>                      | 0,25                  | 0,29     | 0,23     | <b>0,26</b>  | <b>0,031</b> | <b>11,90%</b> |
| <b>330</b>                      | 0,26                  | 0,29     | 0,23     | <b>0,26</b>  | <b>0,030</b> | <b>11,54%</b> |
| <b>360</b>                      | 0,27                  | 0,29     | 0,23     | <b>0,26</b>  | <b>0,031</b> | <b>11,60%</b> |

| <b>Concreto Pavimento (CP)</b> |                       |          |          |              |              |               |
|--------------------------------|-----------------------|----------|----------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Corrente (A)</b>            |                       |          |          |              |              |               |
| <b>Tempo (min)</b>             | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b> | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|                                | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |              |              |               |
| <b>0</b>                       | 0,09                  | 0,1      | 0,09     | <b>0,09</b>  | <b>0,006</b> | <b>6,19%</b>  |
| <b>30</b>                      | 0,1                   | 0,11     | 0,09     | <b>0,10</b>  | <b>0,010</b> | <b>10,00%</b> |
| <b>60</b>                      | 0,11                  | 0,12     | 0,1      | <b>0,11</b>  | <b>0,010</b> | <b>9,09%</b>  |
| <b>90</b>                      | 0,11                  | 0,13     | 0,1      | <b>0,11</b>  | <b>0,015</b> | <b>13,48%</b> |
| <b>120</b>                     | 0,12                  | 0,14     | 0,11     | <b>0,12</b>  | <b>0,015</b> | <b>12,39%</b> |
| <b>150</b>                     | 0,12                  | 0,14     | 0,11     | <b>0,12</b>  | <b>0,015</b> | <b>12,39%</b> |
| <b>180</b>                     | 0,13                  | 0,15     | 0,11     | <b>0,13</b>  | <b>0,020</b> | <b>15,38%</b> |
| <b>210</b>                     | 0,13                  | 0,15     | 0,12     | <b>0,13</b>  | <b>0,015</b> | <b>11,46%</b> |
| <b>240</b>                     | 0,13                  | 0,15     | 0,12     | <b>0,13</b>  | <b>0,015</b> | <b>11,46%</b> |
| <b>270</b>                     | 0,13                  | 0,16     | 0,12     | <b>0,14</b>  | <b>0,021</b> | <b>15,23%</b> |
| <b>300</b>                     | 0,14                  | 0,16     | 0,12     | <b>0,14</b>  | <b>0,020</b> | <b>14,29%</b> |
| <b>330</b>                     | 0,14                  | 0,16     | 0,12     | <b>0,14</b>  | <b>0,020</b> | <b>14,29%</b> |
| <b>360</b>                     | 0,14                  | 0,16     | 0,12     | <b>0,14</b>  | <b>0,020</b> | <b>14,29%</b> |

| <b>Compósito de referência (ECC-REF)</b> |                       |          |          |              |              |               |
|--|-----------------------|----------|----------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Corrente (A)</b>                      |                       |          |          |              |              |               |
| <b>Tempo (min)</b>                       | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b> | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|  | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |              |              |               |
| <b>0</b>                                 | 0,22                  | 0,23     | 0,23     | <b>0,23</b>  | <b>0,006</b> | <b>2,55%</b>  |
| <b>30</b>                                | 0,31                  | 0,31     | 0,32     | <b>0,31</b>  | <b>0,006</b> | <b>1,84%</b>  |
| <b>60</b>                                | 0,4                   | 0,39     | 0,42     | <b>0,40</b>  | <b>0,015</b> | <b>3,79%</b>  |
| <b>90</b>                                | 0,49                  | 0,48     | 0,53     | <b>0,50</b>  | <b>0,026</b> | <b>5,29%</b>  |
| <b>120</b>                               | 0,61                  | 0,59     | 0,64     | <b>0,61</b>  | <b>0,025</b> | <b>4,10%</b>  |
| <b>150</b>                               | 0,77                  | 0,71     | 0,79     | <b>0,76</b>  | <b>0,042</b> | <b>5,50%</b>  |
| <b>180</b>                               | 0,98                  | 0,88     | 1,01     | <b>0,96</b>  | <b>0,068</b> | <b>7,12%</b>  |
| <b>210</b>                               | 1,54                  | 1,26     | 1,62     | <b>1,47</b>  | <b>0,189</b> | <b>12,83%</b> |
| <b>240</b>                               | 2,06                  | 2,01     | 2,2      | <b>2,09</b>  | <b>0,098</b> | <b>4,71%</b>  |

| <b>Compósito com cinza - 28 dias (ECC-CCA-28)</b> |                       |          |          |              |              |               |
|---|-----------------------|----------|----------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Corrente (A)</b>                               |                       |          |          |              |              |               |
| <b>Tempo (min)</b>                                | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b> | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|   | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |              |              |               |
| <b>0</b>  | 0,08                  | 0,09     | 0,07     | <b>0,08</b>  | <b>0,010</b> | <b>12,50%</b> |
| <b>30</b>   | 0,09                  | 0,11     | 0,09     | <b>0,10</b>  | <b>0,012</b> | <b>11,95%</b> |
| <b>60</b>   | 0,1                   | 0,11     | 0,09     | <b>0,10</b>  | <b>0,010</b> | <b>10,00%</b> |
| <b>90</b>   | 0,11                  | 0,125    | 0,1      | <b>0,11</b>  | <b>0,013</b> | <b>11,27%</b> |
| <b>120</b>  | 0,12                  | 0,135    | 0,11     | <b>0,12</b>  | <b>0,013</b> | <b>10,34%</b> |
| <b>150</b>  | 0,13                  | 0,14     | 0,12     | <b>0,13</b>  | <b>0,010</b> | <b>7,69%</b>  |
| <b>180</b>  | 0,15                  | 0,15     | 0,13     | <b>0,14</b>  | <b>0,012</b> | <b>8,06%</b>  |
| <b>210</b>  | 0,16                  | 0,16     | 0,13     | <b>0,15</b>  | <b>0,017</b> | <b>11,55%</b> |
| <b>240</b>  | 0,17                  | 0,17     | 0,14     | <b>0,16</b>  | <b>0,017</b> | <b>10,83%</b> |
| <b>270</b>  | 0,19                  | 0,17     | 0,15     | <b>0,17</b>  | <b>0,020</b> | <b>11,76%</b> |
| <b>300</b>  | 0,2                   | 0,18     | 0,16     | <b>0,18</b>  | <b>0,020</b> | <b>11,11%</b> |
| <b>330</b>  | 0,21                  | 0,18     | 0,16     | <b>0,18</b>  | <b>0,025</b> | <b>13,73%</b> |
| <b>360</b>  | 0,22                  | 0,19     | 0,17     | <b>0,19</b>  | <b>0,025</b> | <b>13,02%</b> |

| <b>Compósito com cinza - 91 dias (ECC-CCA-91)</b> |                       |          |          |              |              |               |
|---|-----------------------|----------|----------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Corrente (A)</b>                               |                       |          |          |              |              |               |
| <b>Tempo (min)</b>                                | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b> | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|   | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |              |              |               |
| <b>0</b>  | 0,04                  | 0,05     | 0,04     | <b>0,04</b>  | <b>0,006</b> | <b>13,32%</b> |
| <b>30</b>   | 0,05                  | 0,06     | 0,04     | <b>0,05</b>  | <b>0,010</b> | <b>20,00%</b> |
| <b>60</b>   | 0,05                  | 0,06     | 0,05     | <b>0,05</b>  | <b>0,006</b> | <b>10,83%</b> |
| <b>90</b>   | 0,05                  | 0,06     | 0,05     | <b>0,05</b>  | <b>0,006</b> | <b>10,83%</b> |
| <b>120</b>  | 0,05                  | 0,06     | 0,05     | <b>0,05</b>  | <b>0,006</b> | <b>10,83%</b> |
| <b>150</b>  | 0,05                  | 0,06     | 0,05     | <b>0,05</b>  | <b>0,006</b> | <b>10,83%</b> |
| <b>180</b>  | 0,05                  | 0,06     | 0,05     | <b>0,05</b>  | <b>0,006</b> | <b>10,83%</b> |
| <b>210</b>  | 0,05                  | 0,07     | 0,05     | <b>0,06</b>  | <b>0,012</b> | <b>20,38%</b> |
| <b>240</b>  | 0,06                  | 0,07     | 0,05     | <b>0,06</b>  | <b>0,010</b> | <b>16,67%</b> |
| <b>270</b>  | 0,06                  | 0,07     | 0,06     | <b>0,06</b>  | <b>0,006</b> | <b>9,12%</b>  |
| <b>300</b>  | 0,06                  | 0,07     | 0,06     | <b>0,06</b>  | <b>0,006</b> | <b>9,12%</b>  |
| <b>330</b>  | 0,06                  | 0,07     | 0,06     | <b>0,06</b>  | <b>0,006</b> | <b>9,12%</b>  |
| <b>360</b>  | 0,06                  | 0,07     | 0,06     | <b>0,06</b>  | <b>0,006</b> | <b>9,12%</b>  |

| <b>Carga elétrica (Coulombs)</b> |               |               |                |               |               |
|----------------------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Corpo de prova</b>            | <b>CE</b>     | <b>CP</b>     | <b>ECC-REF</b> | <b>CCA-28</b> | <b>CCA-91</b> |
| <b>1</b>                         | 4435          | 2396          | 11810          | 2892          | 1040          |
| <b>2</b>                         | 4979          | 2762          | 10957          | 2875          | 1251          |
| <b>3</b>                         | 4037          | 2152          | 12419          | 2437          | 1007          |
| <b>Média</b>                     | <b>4484</b>   | <b>2437</b>   | <b>11729</b>   | <b>2735</b>   | <b>1099</b>   |
| <b>SD</b>                        | <b>473</b>    | <b>307</b>    | <b>734</b>     | <b>258</b>    | <b>132</b>    |
| <b>CV</b>                        | <b>10,55%</b> | <b>12,58%</b> | <b>6,26%</b>   | <b>9,44%</b>  | <b>12,04%</b> |

## **APÊNDICE G – Resultados do Ensaio de Retração livre**

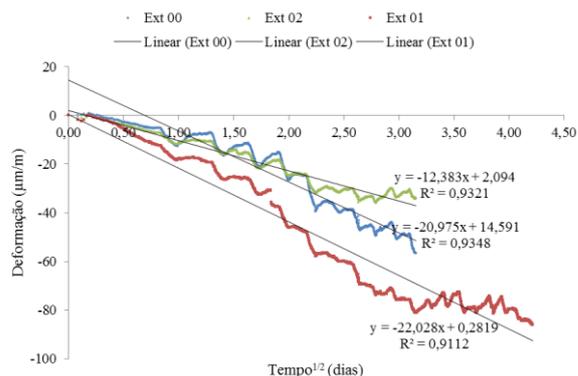
| <b>Concreto Estrutural (CE)</b> |                       |          |          |               |              |               |
|---------------------------------|-----------------------|----------|----------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Retração (mm/m)</b>          |                       |          |          |               |              |               |
| <b>Tempo (dias)</b>             | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b>  | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|                                 | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |               |              |               |
| <b>1</b>                        | 0,000                 | 0,000    | 0,000    | <b>0,000</b>  | <b>0,000</b> | -             |
| <b>4</b>                        | -0,103                | -0,313   | -0,221   | <b>-0,212</b> | <b>0,106</b> | <b>49,66%</b> |
| <b>7</b>                        | -0,186                | -0,463   | -0,285   | <b>-0,312</b> | <b>0,140</b> | <b>45,08%</b> |
| <b>14</b>                       | -0,229                | -0,593   | -0,398   | <b>-0,407</b> | <b>0,182</b> | <b>44,77%</b> |
| <b>21</b>                       | -0,308                | -0,696   | -0,540   | <b>-0,515</b> | <b>0,195</b> | <b>37,97%</b> |
| <b>28</b>                       | -0,335                | -0,768   | -0,649   | <b>-0,584</b> | <b>0,224</b> | <b>38,38%</b> |

| <b>Concreto Pavimento (CP)</b> |                       |          |          |               |              |               |
|--------------------------------|-----------------------|----------|----------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Retração (mm/m)</b>         |                       |          |          |               |              |               |
| <b>Tempo (dias)</b>            | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b>  | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|                                | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |               |              |               |
| <b>1</b>                       | 0,000                 | 0,000    | 0,000    | <b>0,000</b>  | <b>0,000</b> | -             |
| <b>4</b>                       | -0,094                | -0,346   | -0,092   | <b>-0,177</b> | <b>0,146</b> | <b>82,42%</b> |
| <b>7</b>                       | -0,178                | -0,432   | -0,199   | <b>-0,269</b> | <b>0,141</b> | <b>52,28%</b> |
| <b>14</b>                      | -0,290                | -0,586   | -0,353   | <b>-0,410</b> | <b>0,156</b> | <b>38,03%</b> |
| <b>21</b>                      | -0,381                | -0,720   | -0,433   | <b>-0,512</b> | <b>0,183</b> | <b>35,74%</b> |
| <b>28</b>                      | -0,406                | -0,742   | -0,446   | <b>-0,531</b> | <b>0,183</b> | <b>34,54%</b> |

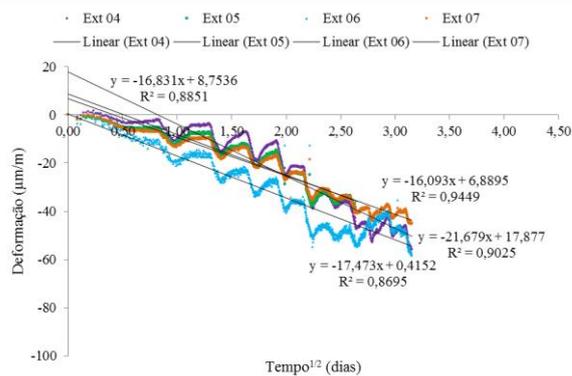
| <b>Compósito de Referência (ECC-REF)</b> |                       |          |          |               |              |               |
|--|-----------------------|----------|----------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Retração (mm/m)</b>                   |                       |          |          |               |              |               |
| <b>Tempo (dias)</b>                      | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b>  | <b>SD</b>    | <b>CV</b>     |
|  | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |               |              |               |
| <b>1</b>                                 | 0,000                 | 0,000    | 0,000    | <b>0,000</b>  | <b>0,000</b> | -             |
| <b>4</b>                                 | -0,352                | -0,643   | -0,543   | <b>-0,513</b> | <b>0,148</b> | <b>28,85%</b> |
| <b>7</b>                                 | -0,593                | -0,780   | -0,719   | <b>-0,697</b> | <b>0,095</b> | <b>13,69%</b> |
| <b>14</b>                                | -0,905                | -1,095   | -1,096   | <b>-1,032</b> | <b>0,110</b> | <b>10,63%</b> |
| <b>21</b>                                | -1,139                | -1,260   | -1,311   | <b>-1,237</b> | <b>0,088</b> | <b>7,14%</b>  |
| <b>28</b>                                | -1,249                | -1,461   | -1,419   | <b>-1,376</b> | <b>0,112</b> | <b>8,14%</b>  |

| <b>Compósito com cinza (ECC-CCA)</b> |                       |          |          |               |              |              |
|--------------------------------------|-----------------------|----------|----------|---------------|--------------|--------------|
| <b>Retração (mm/m)</b>               |                       |          |          |               |              |              |
| <b>Tempo (dias)</b>                  | <b>Corpo de prova</b> |          |          | <b>Média</b>  | <b>SD</b>    | <b>CV</b>    |
|                                      | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> |               |              |              |
| <b>1</b>                             | 0,000                 | 0,000    | 0,000    | <b>0,000</b>  | <b>0,000</b> | -            |
| <b>4</b>                             | -0,464                | -0,425   | -0,450   | <b>-0,446</b> | <b>0,020</b> | <b>4,52%</b> |
| <b>7</b>                             | -0,622                | -0,636   | -0,615   | <b>-0,625</b> | <b>0,011</b> | <b>1,72%</b> |
| <b>14</b>                            | -0,988                | -0,950   | -0,935   | <b>-0,958</b> | <b>0,028</b> | <b>2,90%</b> |
| <b>21</b>                            | -1,099                | -1,083   | -1,074   | <b>-1,085</b> | <b>0,013</b> | <b>1,20%</b> |
| <b>28</b>                            | -1,255                | -1,219   | -1,225   | <b>-1,233</b> | <b>0,019</b> | <b>1,58%</b> |

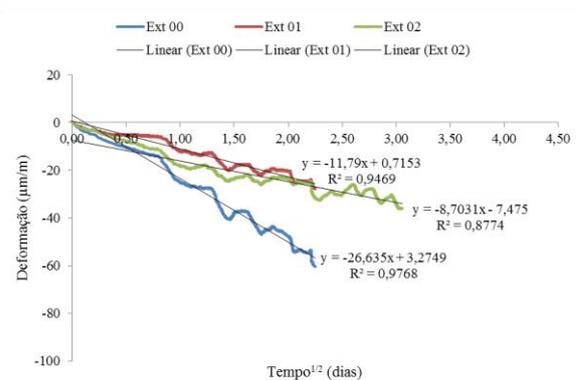
**APÊNDICE H – Gráficos de regressão linear – Ensaio de Retração  
restringida**



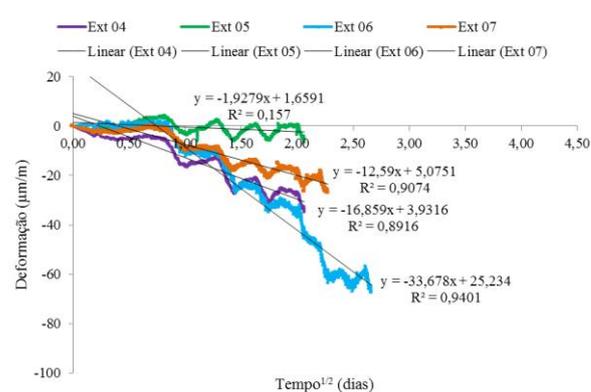
Concreto Estrutural (CE) – Anel 1



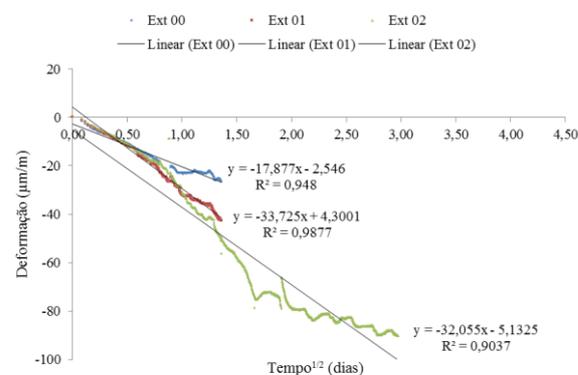
Concreto Estrutural (CE) – Anel 2



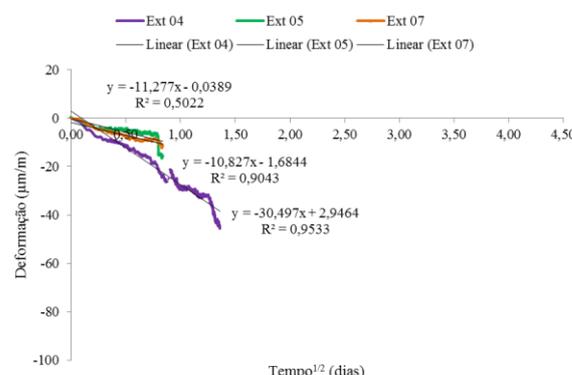
Concreto Pavimento (CP) – Anel 1



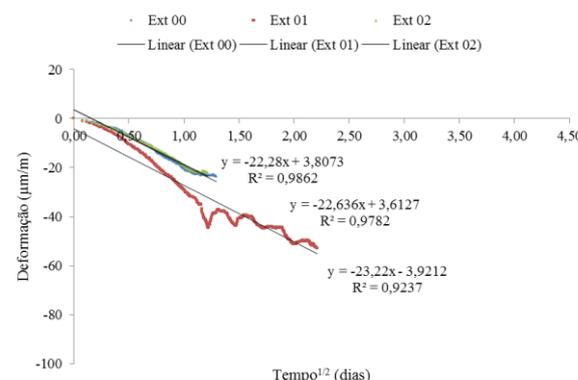
Concreto Pavimento (CP) – Anel 2



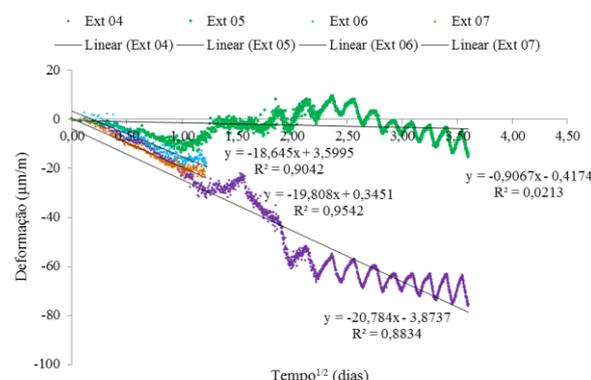
Compósito de referência (ECC-REF) – Anel 1



Compósito de referência (ECC-REF) – Anel 2



Compósito com cinza (ECC-CCA) – Anel 1



Compósito com cinza (ECC-CCA) – Anel 2