

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**PPGECiv**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL EM MATRIZES  
CIMENTÍCIAS**

**Juliana Petermann Moretti**

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos

**Orientador:** Prof. Dr. Almir Sales - UFSCar

**Coorientador:** Prof. Dr. Valdecir Ângelo Quarcioni - IPT

São Carlos

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**PPGECiv**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL EM MATRIZES  
CIMENTÍCIAS**

**JULIANA PETERMANN MORETTI**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutora em Estruturas e Construção Civil.

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos

**Orientador:** Prof. Dr. Almir Sales - UFSCar

**Coorientador:** Prof. Dr. Valdecir Ângelo Quarcioni - IPT

SÃO CARLOS

2018

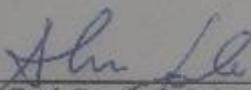


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

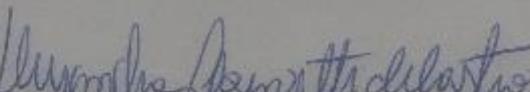
Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado da candidata Juliana Petermann Moretti, realizada em 23/02/2018:



---

Prof. Dr. Almir Sales  
UFSCar



---

Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro  
EESC/USP



---

Prof. Dr. Edvaldo Paulo Sichieri  
USP



---

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira  
UFSCar



---

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Cordoba  
UFSCar

DEDICO ESSE TRABALHO

À MINHA FAMÍLIA,

MELHOR PARTE DE MIM

---

## **AGRADECIMENTOS**

---

Primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado, me guiando, me livrando de todo o mal, e abrindo as portas.

À minha mãe, que tanto se doou, que não mediu esforços para garantir a formação de suas filhas. Mulher guerreira e admirável que despertou meu interesse para o mundo acadêmico.

Ao meu esposo Mário, que sempre me apoiou, incentivou, foi paciente, e não mediu esforços para me auxiliar na concretização desse trabalho. Sem você, nada disso seria possível.

Agradeço à minha avó Olga, que sempre esteve comigo. Mulher incrível de uma força e amor imensuráveis, sem ela e suas orações diárias, com certeza eu não teria forças para seguir.

Ao meu pai, que apesar da distância, sempre me incentivou a estudar, e me ensinou muitas coisas.

À minha irmã, que sempre me ajudou e esteve comigo.

Agradeço a toda minha família (avós, tios e tias, primos e primas, sogro e sogra, cunhados e cunhadas), sem o apoio e paciência de todos vocês esse sonho não teria se tornado realidade.

Também agradeço à minha cachorrinha Biubiu, pelo seu companheirismo e amor incondicional.

Ao meu mentor Professor Almir Sales, pela orientação, confiança, e amizade durante essa longa jornada. Agradeço imensamente por esses vários anos de convívio, sou muito grata por tudo, sem o senhor eu não teria concretizado o meu sonho.

Ao Valdecir Quarcioni, pela coorientação e enorme apoio na realização dos experimentos no IPT.

Ao grande amigo Fernando Almeida, por todo o apoio, contribuições, e também por todos os momentos alegres de conversas e risadas que vivenciamos ao longo dessa longa jornada. À grande amiga Sofia Bessa, por todo o apoio e incentivo que me deu desde a iniciação científica. Ambas amigas que nasceram da pesquisa e permaneceram para a vida.

Às grandes amigas Ludimilla e Laís, por todo o incentivo e apoio, pelos cafés da tarde, jantares. Obrigada pela verdadeira amizade.

Aos Professores Oswaldo Cascudo e Daniel Véras Ribeiro pelas contribuições oferecidas para o desenvolvimento desse trabalho.

Às professoras Fernanda Gianotti e Alessandra Castro pelo apoio e auxílio no desenvolvimento desse trabalho, e também pela amizade.

Ao técnico José Roberto do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) e ao técnico Ricardo Canato do Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE), ambos do Departamento de Engenharia Civil da Ufscar, pelo apoio nos experimentos e amizade.

Aos colegas do LMC: Mariana, Naiara, Pedro, Rafaela, Rosana pelo auxílio no desenvolvimento experimental desse trabalho.

À professora Lucia Mascaro e Murilo Gromboni pelo auxílio nos ensaios eletroquímicos.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e à Fundação de Apoio ao IPT (FIPT), pela oportunidade no âmbito do Programa Novos Talentos.

Aos colegas do Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT pelo acolhimento e auxílio no desenvolvimento experimental desse estudo. Em ordem alfabética: Alexandre Machado, Alexandre Souza, Anderson, Bianca, Drielle, Eduardo Quitete, Eduardo Rocha, Edwin, Erick, Ernan, Fábio, Fabiano, Jéssica, Jilson, José Francisco, Karoline, Lucas, Mírian, Natasha, Nilson, Priscila, Rafael Francisco, Raphael Balduino, Roberto, Sérgio, Sidnei, Thiago, Valdir, Vandir.

À Adriana de Araújo e Thales Gomes Rosa do Laboratório de Corrosão e Proteção, e Kleber Jesus de Oliveira do Laboratório de Equipamentos, ambos do IPT, pelo auxílio nos ensaios de resistividade elétrica

Ao Leandro Bento Augusto do Laboratório de Análises Químicas e Maciel Santos Luz do Laboratório de Processos Metalúrgicos, ambos do IPT, pela análise química do aço.

Ao professor João Baptista Baldo e técnico Luiz Augusto Staffa (Lula), do Departamento de Engenharia de Materiais da Ufscar, pelo auxílio na moagem da ACBC.

Ao Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais de Construção (LME) do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, pela realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Aos meus amigos e família Martha, Cyntia, Isabela, Camila, Christina e Wagner, por me fornecer estadia em São Paulo durante a realização dos meus experimentos no IPT.

Aos meus queridos amigos da POLI Isabela e Leonardo. Obrigada pela amizade, pelo companheirismo de sempre, e pelas longas conversas durante nossos cafés.

Aos meus amigos do DEMA que sempre me ajudaram Felipe, Rodriguinho, Carlão, Cesarito, Chris.

Ao Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais (LEDMA) da Escola Politécnica da UFBA pela determinação de teor de amorfo da ACBC.

Ao grupo Raízen, por disponibilizar a ACBC.

Ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGECiv), da Universidade Federal de São Carlos, pelo auxílio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante o doutorado.

Ao programa ERASMUS MUNDUS pela concessão da bolsa de estudos para a realização do doutorado sanduíche na Universidade do Porto.

À Professora Sandra Nunes pela orientação do doutorado sanduiche. À Paula Silva e Cláudio Ferraz pelo auxílio no desenvolvimento dos experimentos.

Estendo os meus agradecimentos a todos os meus amigos. Vocês fazem o caminho se tornar mais leve e feliz.

Por fim, agradeço a todos, que de alguma maneira, me ajudaram para a realização deste trabalho.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

## RESUMO

---

A proposta dessa pesquisa abrange dois temas importantes: a utilização de um resíduo gerado em larga escala no Brasil e o estudo das propriedades relacionadas à durabilidade de matrizes cimentícias. O Brasil é o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro, e dentre os resíduos gerados, destaca-se o bagaço da cana, o qual é utilizado como biomassa na geração de energia. Após o processo de queima nas usinas, resta nos fundos das caldeiras a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), cuja disposição final é um problema enfrentado pelos administradores das usinas sucroalcooleiras. Dentro desse contexto, o objetivo principal desse estudo foi avaliar a influência da incorporação da ACBC na distribuição de tamanho de poros das matrizes cimentícias, na suscetibilidade ao ingresso de agentes agressivos, e na passivação do aço. Para tanto, o trabalho foi realizado em três etapas. Na primeira etapa realizou-se um processo de beneficiamento, caracterização, e verificação da atividade pozolânica de amostras de ACBC com diferentes distribuições granulométricas. Na segunda etapa, foi realizado um estudo na fase argamassa aplicando a ACBC em substituição parcial do agregado miúdo nos teores de 0%, 10%, 20%, 30%, e 40%, (em volume). Diversos ensaios foram realizados para verificar a influência da aplicação da ACBC nas argamassas, tais como: resistência à compressão, absorção de água por imersão e capilaridade, porosimetria por intrusão de mercúrio, tomografia, resistividade elétrica, penetrabilidade de cloretos, microscopia eletrônica de varredura, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, entre outros. Na terceira etapa, foi verificado o processo de passivação do aço quando exposto à solução de água de poros com e sem ACBC por meio do monitoramento do potencial de circuito aberto (PCA). Posteriormente, os filmes passivadores foram analisados pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. Por meio dos resultados obtidos pode-se verificar que as cinzas analisadas apresentaram baixa reatividade pozolânica. A incorporação da ACBC contribuiu com a redução dos macroporos, aumento da resistividade elétrica, e redução da penetrabilidade de cloretos, para as argamassas com idades mais avançadas (após 91 dias), em comparação com a argamassa de referência (0% ACBC). O filme passivador formado pela solução de água de poros com ACBC estabilizou em um potencial mais positivo que a referência. Além disso, foi possível identificar maior quantidade de óxidos de cálcio na superfície do aço exposto à solução de ACBC quando comparada com a referência. Esses resultados indicam melhoria na qualidade do filme passivador formado em solução contendo ACBC. Por fim, pode-se concluir que a incorporação da ACBC melhorou as propriedades relacionadas à durabilidade das matrizes estudadas.

**Palavras-chave:** areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, argamassa, distribuição de poros, resistividade, água de poros, passivação.

## ABSTRACT

---

The proposal of this research covers two important subjects: the application of a waste generated in large scale in Brazil and the study of properties related to the durability of cement matrices. Brazil leads the world's sugarcane production. Among the wastes generated in sugarcane processing, bagasse stands out due the utilization as biomass to generate energy. After the burning of bagasse, the sugarcane bagasse ash sand (SBAS) remains at the bottom of the boilers. The final disposition of this material is a problem faced by the managers of the sugar and alcohol plants. In this context, the main objective of this study was to evaluate the influence of the SBAS incorporation on the porosity of the cementitious matrices, susceptibility to the aggressive agents ingress, and on the passivation of the steel. Therefore, the study was carried out in three phases. In the first stage a process of beneficiation, characterization, and verification of the pozzolanic activity of SBAS samples with different particle size distributions was performed. In the second phase, a study in the mortar phase applying the SBAS in partial replacement of the natural sand in the contents of 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% (by volume) was carried out. Several tests were carried out to verify the influence of SBAS application on mortars, such as: compressive strength, water absorption by immersion and capillarity, mercury intrusion porosimetry, tomography, electrical resistivity, chloride penetrability, scanning electron microscopy, hydrogenation potential, electrical conductivity, among others. In the third stage, the steel passivation process was verified when exposed to the pore water solution with and without SBAS by monitoring the open circuit potential. Subsequently, the passivating films were analyzed by scanning electron microscopy technique. Through of the obtained results it can be verified that the ashes analyzed showed low pozzolanic reactivity. The SBAS incorporation contributed to the reduction of macropores, increased the electrical resistivity, and reduction of the chloride penetrability, for the mortars with advanced ages (after 91 days), compared to the reference mortar (0% SBAS). The passivating film formed by the pore water solution with SBAS stabilized at a more positive potential than the reference. In addition, it was possible to identify higher amounts of calcium oxides on the surface of the steel exposed to the SBAS solution when compared to the reference. These results indicate a possible improvement in the quality of the passivating film formed in solution containing SBAS. Finally, it can be concluded that the incorporation of SBAS improved properties related to the durability of the matrices studied.

**Keywords:** sugarcane bagasse ash sand, mortar, porosity, resistivity, pore solution, passivation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Difratoograma da cinza leve (a) e cinza pesada (b). .....	25
Figura 2- Microscopia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	26
Figura 3- Micrografia eletrônica de varredura: etringita e portlandita (a), C-S-H (b).....	34
Figura 4- Porosidade da pasta de cimento. ....	37
Figura 5- Zona de transição do agregado e pasta de cimento .....	38
Figura 6- Caminhos formados pela porosidade do concreto.....	38
Figura 7- Dimensão de poros e principais mecanismos de transporte. ....	39
Figura 8- Principais fatores envolvidos nos fenômenos de transporte no interior dos materiais porosos. ....	40
Figura 9- Micrografia de pasta produzida com cinza volante: 7 dias de cura (a), 91 dias de cura (b)....	47
Figura 10- Ilustração da deposição do C-S-H nos poros da matriz cimentícia. ....	51
Figura 11 – Ângulo de contato do mercúrio e da água (a), pressão aplicada para a penetração do mercúrio (b).....	53
Figura 12- Poro pequeno conectado com o exterior através de um grande poro (a), poro grande conectado com o exterior através de um pequeno poro (b). ....	54
Figura 13- Esquema de funcionamento do tomógrafo.....	55
Figura 14- Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico.....	60
Figura 15- Diagrama de Evans para a polarização do aço em concreto.....	61
Figura 16- Curva granulométrica das areias. ....	70
Figura 17- Coleta e quarteamento da ACBC.....	71
Figura 18- Moinho de bolas. ....	72
Figura 19- Jarro (a) e bolas de alumina (b).....	72
Figura 20- Equipamento utilizado no ensaio de picnometria de hélio. ....	74
Figura 21 – Analisador de partículas Mastersizer 2000.....	75
Figura 22 – Amostra de ACBC (a) e microscópio utilizado (b). ....	77
Figura 23 – pHmetro utilizado. ....	80
Figura 24 – Amostra de ACBC preparada para ensaio de MEV(a), MEV utilizado (b). ....	81
Figura 25 – Batedeira utilizada. ....	83
Figura 26 – Moldes utilizados (a), moldagem das argamassas (b), proteção da amostra com plástico filme (c), acondicionamento em câmara úmida (d).....	84
Figura 27- Corpos de prova utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade: impermeabilização da amostra (a), amostras em contato com lâmina d'água (b). ....	86
Figura 28- Tomógrafo utilizado .....	87
Figura 29- Amostra cilíndrica (a), amostra cúbica (b) e amostra prismática (c). ....	88
Figura 30- Corte das amostras (a), prismas obtidos (b). ....	90
Figura 31- Impregnação das amostras de argamassa para análise petrográfica. ....	91
Figura 32- Amostras utilizadas na análise petrográfica. ....	91
Figura 33- Corte dos corpos de prova (a), amostras (b), vácuo (c), saturação (d), montagem da célula (e), monitoramento (f). ....	93
Figura 34- Marcações realizadas nos corpos de prova de resistividade elétrica. ....	94
Figura 35- Extração do pó das argamassas (a), filtragem da solução (b), medida de condutividade elétrica (c), medida de pH (d). ....	96
Figura 36- Amostras de argamassas utilizadas no MEV. ....	97
Figura 37- Preparo das soluções: agitação (a), filtragem (b), aspecto da solução pronta (c).....	99
Figura 38- Processo de confecção do eletrodo de trabalho. Barras de CA-60 imersas na solução decapante (a), aço limpo embutido na resina epóxi (b), eletrodos cortados transversalmente (c) e eletrodos prontos já com o contato elétrico (d). ....	100
Figura 39- Célula, eletrodo de trabalho e eletrodo de referência. ....	101
Figura 40- Distribuição granulométrica discreta das amostras de ACBC.....	103
Figura 41- Difratoogramas das amostras de ACBC. ....	105
Figura 42- Curvas TG/DTG da ACBC.....	106
Figura 43- Micrografias das amostras de ACBC: ACBC N (a), ACBC 30 (b), ACBC 60 (c), ACBC 90 (d), ACBC 120 (e), ACBC 240 (f), ACBC Micro (g).....	107
Figura 44- D90 versus consumo de cal. ....	109

Figura 45- Porcentagem de partículas menores que 5 µm versus consumo de cal.....	110
Figura 46- Distribuição granulométrica dos materiais.....	112
Figura 47- Micrografia da ACBC: partículas de quartzo (a), partículas de cinza (b), partícula de cinza de superfície rugosa (c), partícula de cinza de superfície lisa e porosa (d).....	113
Figura 48- Partícula de cinza aderida ao quartzo (a), partícula de cinza (b), microanálise da cinza (c), partícula de quartzo (d), microanálise do quartzo (e).....	114
Figura 50- Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28, 91 e 365 dias.....	118
Figura 51- Absorção capilar das argamassas aos 7 dias (a), 28 dias (c) e 91 dias (c), e sortividade (d). .....	119
Figura 52- Absorção capilar aos 7, 28, e 91 dias das argamassas 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d), e 40% ACBC (e). ....	120
Figura 53- Distribuição de poros e incremento de volume das argamassas.....	122
Figura 54- Curvas acumuladas da distribuição de poros das argamassas. ....	123
Figura 55- Índice de porosidade (poros maiores e menores que 0,1 µm). ....	124
Figura 56- Tomografia da região central das argamassas: 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d), 40% ACBC (e).....	125
Figura 57- Frequência acumulada de diâmetros de poros das argamassas.....	125
Figura 58- Distribuição de poros das argamassas.....	126
Figura 59- Porosidade das argamassas: 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d) e 40% ACBC (e). ....	127
Figura 60- Tomografia de diferentes regiões da argamassa 40% ACBC.....	128
Figura 61- Micrografias das argamassas: 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d) e 40% ACBC (e). ....	129
Figura 62- Microscopias das argamassas: 0% ACBC (a) e 40% ACBC (b e c). ....	130
Figura 63- Carga elétrica passante até 150 minutos de ensaio.....	131
Figura 64- Correlação carga elétrica passante versus índice ACBC/c das argamassas. ....	132
Figura 65- Resistividade elétrica das argamassas.....	133
Figura 66- Correlação índice ACBC/c versus resistividade elétrica das argamassas: 7 dias (a), 28 dias (b), 91 dias (c), 365 dias (d).....	134
Figura 67- Relação entre resistividade elétrica e resistência à compressão das argamassas aos 7 (a), 28 (b), 91 (c) e 356 (d) dias. ....	136
Figura 68- Relação entre resistividade elétrica e absorção capilar das argamassas aos 7 (a), 28 (b), 91 (c) e 356 (d) dias.....	137
Figura 69- Relação entre resistividade elétrica e volume de poros das argamassas aos 91.....	138
Figura 70- Relação entre resistividade elétrica e frequência de poros das argamassas aos 91 dias.....	138
Figura 71- Correlação carga elétrica passante versus resistividade elétrica das argamassas: 28 dias (a), 91 dias (b).....	139
Figura 72- Correlação resistividade elétrica e permeabilidade das argamassas. ....	141
Figura 73- Micrografias da argamassa de Referência: formação de C-S-H e CH (a), bolha de ar preenchida com etringita, pontos de microanálise EDS (c e d). ....	142
Figura 74- Micrografias da argamassa 30% ACBC: partícula de cinza e pasta de cimento (a), halo de hidratação da cinza (b), cinza (c), bolha de ar preenchida com etringita e portlandita (d). ....	143
Figura 75- Microanálise das diferentes regiões da partícula de cinza incorporada na argamassa 30% ACBC.....	144
Figura 76- Micrografias da argamassa 30% ACBC com pontos de microanálise EDS. ....	145
Figura 77- Monitoramento do PCA dos eletrodos imersos nas soluções de REF e 30% ACBC. ....	146
Figura 78- Micrografias: aço (a), filme passivador REF (b), filme passivador 30% ACBC (c). ....	148
Figura 79- Mapeamento do filme referência .....	149
Figura 79- Mapeamento do filme 30% ACBC .....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química das cinzas leves e cinzas pesadas (% em massa) .....	25
Tabela 2- Sinopse das pesquisas relacionadas ao resíduo da queima do bagaço da cana.....	27
Tabela 3- Classificação da porosidade de pastas cimentícias. ....	36
Tabela 4- Classificação das adições minerais.....	46
Tabela 5- Características de diversas cinzas do bagaço da cana utilizadas em diferentes estudos.....	49
Tabela 5- Características de diversas cinzas do bagaço da cana utilizadas em diferentes estudos.....	50
Tabela 6- Valores de resistividade e riscos associados.....	56
Tabela 7- Classificação quanto ao risco de penetração de cloretos de concretos.....	59
Tabela 8- Características físicas e químicas – CP V ARI PLUS. ....	67
Tabela 9- Características físicas das areias naturais. ....	68
Tabela 10- Distribuição granulométrica das areias.....	69
Tabela 11- Composição química do aço CA-60.....	70
Tabela 12- Teor de SP e consistência das argamassas produzidas.....	79
Tabela 13- Quantidade de água e consistência das argamassas produzidas.....	80
Tabela 14- Composições das argamassas estudadas.....	82
Tabela 15- Consumo de materiais.....	82
Tabela 16- Parâmetros utilizados no ensaio de tomografia.....	88
Tabela 17- Proporção de materiais utilizados para a obtenção das soluções de extração dos compostos solúveis da fase argamassa.....	98
Tabela 18- Massa específica e parâmetros granulométricos da ACBC.....	103
Tabela 19- Composição química da ACBC utilizada e cinzas utilizadas na pesquisa de Sales & Lima (2010).....	104
Tabela 20- pH das amostras de ACBC e areias.....	108
Tabela 21- Resultados obtidos no ensaio de Chapelle Modificado.....	109
Tabela 22- Índice de atividade pozolânica com a cal.....	110
Tabela 23- Índice de desempenho com cimento Portland.....	111
Tabela 25- Resultados do ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios, e massa específica das argamassas nas idades de 7, 28 e 91 dias.....	116
Tabela 25- Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas aos 7, 28, 91 e 365 dias.....	117
Tabela 26- Resultados do ensaio de PIM.....	122
Tabela 27 – Somatório do volume de mercúrio intrudido correspondente aos poros maiores e menores que 0,1 µm.....	123
Tabela 28- Resultados de condutividade elétrica e pH das soluções produzidas com as argamassas após 365 dias de cura.....	140
Tabela 29- Dados utilizados para a previsão da permeabilidade das argamassas.....	140
Tabela 30- pH e condutividade elétrica das soluções de água de poro com e sem ACBC.....	145
Tabela 31- Valores de Potencial para verificar a Probabilidade de corrosão.....	147
Tabela 32 – Elementos identificados nos filmes passivadores.....	150
Tabela 34 – Dados do ensaio de absorção de água aos 7 dias.....	164
Tabela 35 – Dados do ensaio de absorção de água aos 28 dias.....	165
Tabela 36 – Dados do ensaio de absorção de água aos 91 dias.....	165
Tabela 37 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 7 dias.....	166
Tabela 38 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 28 dias.....	166
Tabela 39 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 91 dias.....	166
Tabela 40 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 365 dias.....	167
Tabela 40 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 7 dias.....	168
Tabela 41 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.....	169
Tabela 42 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 91 dias.....	170
Tabela 43 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 7 dias.....	171
Tabela 44 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 7 dias.....	171
Tabela 45 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 7 dias.....	172

Tabela 46 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 7 dias. ....	172
Tabela 47 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 7 dias. ....	173
Tabela 48 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 28 dias. .	173
Tabela 49 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 28 dias. ....	174
Tabela 50 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 28 dias. ....	174
Tabela 51 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 28 dias. ....	175
Tabela 52 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 28 dias. ....	175
Tabela 53 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 91 dias. .	176
Tabela 54 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 91 dias. ....	176
Tabela 55 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 91 dias. ....	177
Tabela 56 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 91 dias. ....	177
Tabela 57 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 91 dias. ....	178
Tabela 58 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 365 dias.	178
Tabela 59 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 365 dias. ....	179
Tabela 60 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 365 dias. ....	179
Tabela 61 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 365 dias. ....	180
Tabela 62 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 365 dias. ....	180

## LISTA DE SIGLAS

---

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c - Relação água/cimento

ACBC - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar

ACBC N - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar natural

ACBC 30 - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar moída durante 30 minutos

ACBC 60 - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar moída durante 60 minutos

ACBC 90 - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar moída durante 90 minutos

ACBC 120 - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar moída durante 120 minutos

ACBC 240 - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar moída durante 240 minutos

ACBC Micro - Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar micronizada

ACI - American Concrete Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials Standards

BA - Bolhas de ar

BSED - Detector de elétrons retroespalhados

C - Cristobalita

Ca(OH)<sub>2</sub> - Hidróxido de cálcio

Ca/Si – Relação entre o teor de cálcio e sílica.

CH - Hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>)

C-S-H -Silicato de cálcio hidratado

DRX - Difração de raios-X

DTG – Termogravimetria derivada

D10 – Tamanho abaixo do qual se encontra 10% do volume de material

D50 – Tamanho abaixo do qual se encontra 50% do volume de material

D90 – Tamanho abaixo do qual se encontra 90% do volume de material

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva

FRX - Fluorescência de raios-X

GESEC - Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Eco-eficiência em Construção Civil e Urbana

H - Hematita

IAP - Índice de atividade pozolânica

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LMC - Laboratório de Materiais e Componentes

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MP – Microporosidade na pasta

NBR - Norma brasileira

NM - Norma Mercosul

P - Pseudobruquita

PCA - Potencial de circuito aberto

PIM - Porosimetria por intrusão de mercúrio

pH - Potencial de hidrogeniônico

Q - Quartzo

REF - argamassa ou solução de referência (sem ACBC)

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages

SE - Detector de elétrons secundários

Si - Sílica

TG - Termogravimetria

VIPA – Vazios na interface agregado-pasta

0% ACBC - Argamassa produzida sem ACBC (referência)

10% ACBC - Argamassa produzida com 10% de ACBC em substituição (em volume) à areia fina

20% ACBC - Argamassa produzida com 20% de ACBC em substituição (em volume) à areia fina

30% ACBC - Argamassa produzida com 30% de ACBC em substituição (em volume) à areia fina

40% ACBC - Argamassa produzida com 40% de ACBC em substituição (em volume) à areia fina

---

1	INTRODUÇÃO .....	19
1.1	Hipóteses da pesquisa.....	21
1.2	Objetivo.....	21
1.3	Estrutura da Tese .....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	24
2.1	Resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar .....	24
2.2	Matriz Cimentícia.....	32
2.2.1	Fase sólida .....	32
2.2.2	Fase líquida .....	34
2.2.3	Fase porosa .....	35
2.3	Mecanismos de transporte em matrizes cimentícias .....	40
2.3.1	Absorção capilar.....	40
2.3.2	Permeabilidade .....	42
2.3.3	Difusão .....	43
2.3.4	Migração.....	44
2.4	Adições minerais .....	45
2.4.1	Influência da incorporação de adições minerais em matrizes cimentícias.....	50
2.5	Ensaio utilizados para analisar a porosidade e o transporte dos agentes agressivos em matrizes cimentícias .....	53
2.5.1	Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).....	53
2.5.2	Tomografia computadorizada de raios-X.....	55
2.5.3	Resistividade elétrica.....	56
2.5.4	Absorção de água por capilaridade.....	58
2.5.5	Penetrabilidade de cloretos.....	58
2.6	Passivação do aço em concreto.....	60
3	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....	64
3.1	Materiais.....	67
3.1.1	Cimento Portland.....	67
3.1.2	Areias .....	67
3.1.3	Aço CA 60.....	70
3.2	1ª Etapa: Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC).....	70
3.2.1	Coleta e beneficiamento da ACBC .....	71
3.2.2	Caracterização da ACBC.....	73
3.3	2ª Etapa: Argamassas .....	82
3.3.1	Moldagem e cura .....	82

3.3.2	Ensaio realizado nas argamassas .....	84
3.4	3ª Fase: Solução de água de poros .....	97
3.4.1	Preparação das soluções de água de poro das argamassas. ....	97
3.4.2	Preparação do eletrodo de trabalho e célula eletroquímica. ....	99
3.4.3	Potencial de circuito aberto (PCA) .....	101
3.4.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV). ....	101
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	103
4.1	Caracterização da ACBC .....	103
4.1.1	Massa específica e distribuição granulométrica .....	103
4.1.2	Espectroscopia de Fluorescência de raios-X (FRX).....	104
4.1.3	Difração de raios-X (DRX). ....	104
4.1.4	Análise termogravimétrica (TG).....	105
4.1.5	Microscopia ótica. ....	106
4.1.6	Potencial hidrogeniônico (pH).....	108
4.1.7	Atividade pozolânica da ACBC.....	108
4.1.8	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microanálise EDS. ....	112
4.2	Propriedades das argamassas .....	115
4.2.1	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas .	115
4.2.2	Resistência à compressão. ....	116
4.2.3	Absorção de água por capilaridade .....	118
4.2.4	Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) .....	121
4.2.5	Tomografia computadorizada de raios-X.....	124
4.2.6	Análise petrográfica.....	129
4.2.7	Penetrabilidade de cloretos .....	131
4.2.8	Resistividade Elétrica .....	132
4.2.9	Condutividade elétrica e pH das argamassas .....	139
4.2.10	Previsão da permeabilidade das argamassas .....	140
4.2.11	Microscopia eletrônica de varredura das argamassas.....	141
4.3	Passivação .....	145
4.3.1	Condutividade elétrica e pH das soluções de água de poros. ....	145
4.3.2	Monitoramento do Potencial de circuito aberto (PCA). ....	146
4.3.3	Microscopia eletrônica de varredura.....	147
5	CONCLUSÕES.....	151
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	153
7	REFERÊNCIAS .....	154
	ANEXO A.....	164

ANEXO B.....	166
ANEXO C.....	168
ANEXO D.....	171

# 1 INTRODUÇÃO

A proposta dessa pesquisa abrange dois temas muito importantes: a aplicação de um resíduo gerado em larga escala no Brasil; e a investigação da influência desse novo insumo nas propriedades relacionadas à durabilidade de matrizes cimentícias.

A crescente demanda por materiais sustentáveis na construção civil leva a necessidade da geração de dados técnicos e científicos para garantir a qualidade e confiabilidade desses novos materiais. Além disso, a utilização de resíduos produzidos em larga escala poderá mitigar os impactos ambientais negativos resultantes da disposição no ambiente e agregar valor a um novo insumo.

Nesse estudo foi utilizado um resíduo gerado no processamento da cana-de-açúcar, a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC). O Brasil lidera a produção mundial de cana-de-açúcar; na safra 2016/2017 foram produzidos 650 milhões de toneladas (ÚNICA, 2018). Dentre os resíduos gerados no processamento da cana, destaca-se o bagaço, o qual é utilizado como biomassa. Pela queima do bagaço, as usinas geram energia para o próprio consumo e vendem o excedente para as companhias de energia. Após esse processo, são geradas as cinzas pesadas (provenientes das caldeiras) e as cinzas leves (provenientes dos filtros). Considerando a safra de 2015/2016, estima-se a geração de 4 milhões de toneladas de cinzas, e o manejo dessas cinzas é um problema para os administradores das usinas. Vale salientar que nesse estudo foi utilizada a cinza das caldeiras (cinza pesada), nomeada por Almeida (2015) como areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) devido à grande quantidade de areia incorporada ao material.

A construção civil, mais especificamente a produção de concretos, tem potencial para incorporar esses resíduos contribuindo tanto em termos da solução de disposição ambiental, como também diminuindo a extração de matérias-primas.

O concreto armado é considerado o principal material de construção devido sua maior durabilidade quando comparado ao aço, tijolos e madeira. Mas, as condições de exposição e interações com o meio podem danificá-lo e comprometer sua durabilidade. Diante disso, pesquisas que estudem o comportamento do concreto com foco na durabilidade são de grande valia.

A durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto (relação água/cimento, porosidade, resistência à compressão), da espessura e da qualidade do cobrimento da armadura.

De maneira geral, as reações químicas se manifestam no concreto por meio dos efeitos físicos, como a permeabilidade, porosidade, tensões internas, entre outros, e, tais efeitos provocam diversas consequências nocivas e danosas ao concreto. Os principais efeitos danosos são: perda de rigidez, perda de alcalinidade, perda de resistência, fissuração, deformação e, como consequência, aumento da taxa de deterioração (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006).

Um dos principais problemas relacionados à durabilidade em estruturas de concreto armado é a corrosão de armaduras, e esse fenômeno é resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica e podem ser ou não relacionados a ações físicas ou mecânicas de deterioração (RIBEIRO, et. al., 2014).

A armadura no interior do concreto encontra-se protegida pela barreira física do cobrimento e pela película passivadora formada na superfície do aço. A solução intersticial altamente alcalina existente nos poros do concreto promove a formação e manutenção desse filme passivador. Dessa forma, a corrosão só irá ocorrer quando a armadura perder essa proteção.

Dentro desse contexto, a incorporação de novos materiais pode alterar as propriedades físicas, mecânicas, e químicas das matrizes cimentícias, podendo interferir também na sua durabilidade.

Estudos preliminares atestaram a viabilidade técnica de aplicação da ACBC em substituição parcial da areia natural na produção de matrizes cimentícias (ALMEIDA, 2013; ALMEIDA et al., 2015; ARIF; CLARK; LAKE, 2017; LIMA, 2011; MORETTI et al., 2016; SALES; LIMA, 2010). Lima (2011) concluiu que é possível produzir artefatos para infraestrutura urbana com qualidade compatível às exigências da construção civil por meio da substituição parcial da areia natural pela ACBC. Como principais resultados, o autor verificou que as matrizes produzidas com a ACBC apresentaram maior rigidez quando comparadas com a referência (sem ACBC), a substituição da areia natural pela ACBC não interferiu de forma significativa em termos de durabilidade (profundidade de carbonatação, abrasão, condutividade térmica, e reatividade potencial álcali-agregado). Além disso, em termos ambientais, a ACBC pode ser considerada um resíduo passível de ser aplicado em substituição parcial da areia natural. Almeida (2013) estudou o potencial de corrosão das armaduras em concretos produzidos com a ACBC e concluiu que a incorporação da cinza provocou um retardo na probabilidade de ocorrência da corrosão e redução na profundidade de penetração de cloretos. Almeida et al. (2015) inferiu que a ACBC pode ter preenchido os poros menores das matrizes cimentícias, contribuindo assim com o melhor desempenho observado nas matrizes produzidas

com a ACBC em comparação à matriz de referência (sem ACBC). Arif et al. (2017) observaram um ganho de resistência mecânica e menor retração nos concretos produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial da areia natural; por outro lado, houve um aumento no ingresso de cloretos.

A incorporação de adições minerais em matrizes cimentícias pode promover benefícios em suas propriedades através da alteração da estrutura porosa (HELENE, 1995). Por meio da revisão da literatura constatou-se uma investigação limitada da porosidade das matrizes produzidas com a ACBC em substituição parcial do agregado miúdo. Nesse contexto, esse estudo buscou explorar de forma mais ampla a porosidade das argamassas produzidas com diferentes teores de ACBC em substituição parcial à areia natural. Além disso, também foi investigada a suscetibilidade dessas matrizes ao transporte de alguns agentes agressivos.

Além da influência na porosidade, a incorporação de novos materiais pode modificar a composição química da solução intrínseca existente nos poros do concreto. No caso do concreto armado, sabe-se que essa solução é responsável por promover a passivação da armadura e manter essa proteção com o decorrer do tempo. Desse modo, a incorporação de um novo material pode alterar a passivação do aço e também a morfologia do filme protetor formado. Dentro desse contexto, verificou-se a influência da ACBC na passivação do aço por meio do monitoramento do potencial de circuito aberto e análise microscópica do filme formado. Vale destacar que esse trabalho é pioneiro no estudo da passivação de armaduras em solução de água de poros contendo ACBC.

## **1.1 Hipóteses da pesquisa**

Nesta pesquisa, temos as seguintes hipóteses:

- A incorporação da ACBC pode alterar a distribuição de poros das argamassas.
- A incorporação da ACBC pode alterar a passivação do aço e também a morfologia do filme passivador.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo geral desse estudo foi avaliar a influência da incorporação da ACBC na porosidade das matrizes cimentícias, na suscetibilidade ao ingresso de agentes agressivos, e na passivação do aço.

### **Objetivos específicos**

- Analisar a reatividade pozolânica da ACBC com diferentes distribuições granulométricas;
- Contribuir com a alteração da distribuição de tamanho de poros das argamassas por meio da incorporação da ACBC em substituição parcial da areia natural;
- Avaliar a suscetibilidade das argamassas produzidas com e sem ACBC ao transporte dos agentes agressivos por meio dos seguintes ensaios: absorção de água por imersão e capilaridade, penetrabilidade de cloretos, e resistividade elétrica;
- Monitorar o desenvolvimento da hidratação das argamassas produzidas com e sem ACBC por meio do ensaio de resistividade elétrica;
- Contribuir com a melhora/manutenção das propriedades relacionadas à durabilidade das argamassas produzidas com a ACBC;
- Analisar a influência da ACBC na passivação do aço em solução de água de poros com e sem ACBC.

### 1.3 Estrutura da Tese

A tese está estruturada em 7 capítulos.

No Capítulo 1 está apresentada a introdução, objetivos, e a estrutura da tese.

No Capítulo 2 está apresentada uma revisão da literatura tratando dos seguintes temas: o resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar; os principais aspectos da microestrutura do concreto (fase sólida, fase líquida e fase porosa); os mecanismos de transporte em matrizes cimentícias; as adições minerais; os ensaios utilizados para analisar a porosidade e o transporte dos agentes agressivos em matrizes cimentícias; e a passivação do aço em concreto.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento experimental do estudo. O estudo experimental foi dividido em três fases principais. Na primeira fase foi realizado um estudo exploratório para avaliar as características da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar com diferentes distribuições granulométricas. Na segunda fase foi realizado um estudo na fase argamassa para verificar as alterações provocadas pela incorporação da ACBC principalmente no quesito de porosidade e no transporte dos agentes agressivos no interior da matriz. Na terceira fase, foi realizado um estudo em solução de água de poros com o foco de avaliar a influência da ACBC na passivação do aço.

No Capítulo 4 estão apresentados os resultados e discussões referentes às três fases do estudo.

As conclusões obtidas por meio das análises realizadas estão apresentadas no Capítulo 5 e as sugestões para trabalhos futuros no Capítulo 6.

As referências bibliográficas estão apresentadas no Capítulo 7, e por fim os anexos A, B, C e D.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar

A produção de cana-de-açúcar no Brasil aumentou 70% entre os anos de 2005 e 2014. Na safra 2016/2017 foram produzidas 650 milhões de toneladas de cana (UNICA, 2018a).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, obtendo liderança na produção de açúcar e segundo maior produtor de etanol (UNICA, 2017). A produção de açúcar e etanol gera grande quantidade de resíduos. Os principais resíduos gerados são: vinhaça, torta de filtro e o bagaço; estima-se que uma tonelada de cana pode gerar de 800 a 1000 litros de vinhaça, de 100 a 400 kg de torta de filtro e 260 kg de bagaço, sendo todos estes resíduos aproveitados. Outros resíduos como águas residuárias, óleo fúsel e levedura são menos preocupantes, apresentam menores quantidades e também são reaproveitados (JENDIROBA, 2006).

Dentre os resíduos gerados no processamento da cana, destaca-se o bagaço, o qual é utilizado como biomassa para a geração de energia elétrica. Das 355 usinas de cana-de-açúcar existentes no Brasil, 177 ofertam o excedente gerado para a rede elétrica (UNICA, 2015b). A geração de energia através da biomassa vem crescendo no Brasil. Em 2014, o país foi destaque mundial nesse setor apresentando a maior capacidade instalada. Dentre as fontes de energia utilizadas no Brasil, a energia gerada pela biomassa representa 10%, e, dentre as fontes de biomassa, o bagaço da cana-de-açúcar representa 79% desse total (UNICA, 2015b).

Estima-se que a cada tonelada de bagaço queimado, gera-se 24 quilos de cinza (FIESP/CIESP, 2001), e desta forma, considerando a safra de 2014/2015, foram gerados 4 milhões de toneladas de cinza do bagaço da cana-de-açúcar. O Estado de São Paulo é responsável por cerca de 60% da produção de cana-de-açúcar do Brasil, sendo assim, a previsão de geração de cinza é de cerca de 6.000 toneladas/dia.

Um dos problemas enfrentados pelos administradores das usinas refere-se à disposição dessas cinzas residuais, que pode ser temporária (armazenamento para reintrodução no cultivo da cana) ou definitiva no ambiente. Na maior parte dos casos, as cinzas residuais são aproveitadas no campo como adubação orgânica nas lavouras de cana (apesar de ser um material com poucos nutrientes) ou descartadas na natureza sem um manejo adequado (FIESP/CIESP, 2001; MANHÃES, 1999).

A cinza residual é composta principalmente por sílica (Tabela 1). Elemento proveniente da estrutura da planta e também do solo da lavoura (CORDEIRO et al., 2009). Existem dois tipos de cinzas geradas na indústria sucroalcooleira. A cinza leve, proveniente dos filtros das chaminés, e as cinzas pesadas, provenientes das caldeiras das usinas. Geralmente as

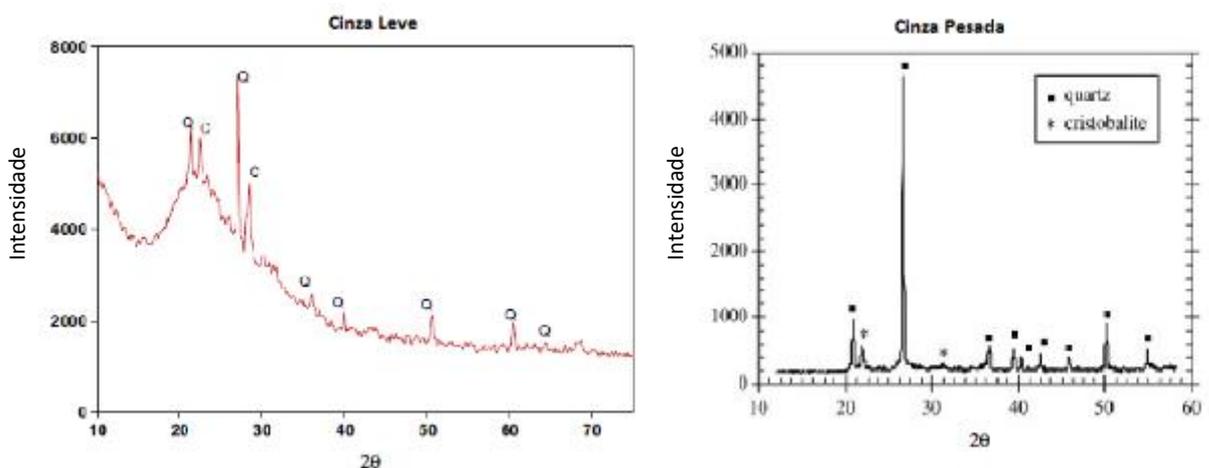
cinzas leves apresentam perda ao fogo elevada (Tabela 1) e maior reatividade, devido o elevado teor de sílica amorfa. Já as cinzas pesadas, apresentam baixa perda ao fogo (Tabela 1) e grandes quantidades de quartzo (sílica cristalina) em sua composição, apresentando assim, baixa reatividade.

Tabela 1- Composição química das cinzas leves e cinzas pesadas (% em massa)

Elementos	Cinza Leve		Cinza Pesada		
	(BAHURUDEEN et al., 2014)	(FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011)	(ALMEIDA et al., 2015)	(CORDEIRO et al., 2009)	(SALES; LIMA, 2010)
SiO <sub>2</sub>	57,63	55,97	80,80	78,3	88,2
CaO	6,14	0,84	1,6	2,2	0,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,33	12,44	2,5	8,6	2,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50	6,50	5,80	3,6	5,1
MgO	1,56	0,48	1,5	1,7	0,4
K <sub>2</sub> O	7,33	0,90	3,9	3,5	1,3
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,00	0,2	0,1	0,1
SO <sub>3</sub>	3,52	1,00	0,1	0,0	<0,1
Perda ao fogo	21,00	17,98	0,7	0,42	0,35

Na Figura 1 estão apresentados dois difratogramas provenientes de diferentes cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. Pode-se verificar no difratograma proveniente de uma cinza leve a presença de halo amorfo, indicando uma estrutura predominantemente amorfa (sílica amorfa), ou seja, reativa do material. No difratograma proveniente de uma cinza pesada, é possível identificar picos bem definidos (quartzo e cristobalita) e ausência de halo amorfo, indicando assim uma estrutura predominantemente cristalina.

Figura 1- Difratograma da cinza leve (a) e cinza pesada (b).



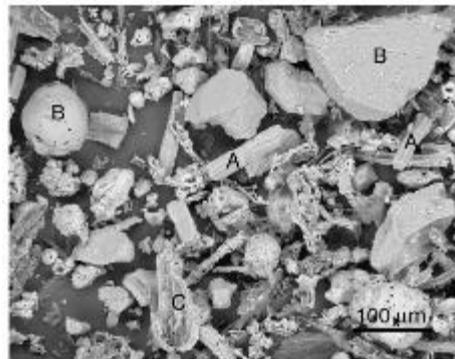
(a)

(b)

Fontes: Bahurudeen & Santhanam (2015) e Cordeiro et al. (2009) .

As partículas de cinza apresentam diferentes tamanhos e formas. Nos estudos realizados por Govindarajan & Jayalakshmi (2011) e Batra et al. (2008), as amostras de cinza apresentaram formas prismáticas, esféricas e fibrosas. As partículas prismáticas (Figura 2 “A”) contêm principalmente Si e O, as partículas esféricas (Figura 2 “B”) contêm Si, O, Na, K, Al, Mg e Ca, e as partículas fibrosas (Figura 2 “C”) são constituídas de carbono, sendo que o principal componente é a sílica em forma de quartzo (BATRA; URBONAITE; SVENSSON, 2008).

Figura 2- Microscopia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Batra et al. (2008)

A aplicação das cinzas deve ser realizada de acordo com sua composição química e mineralógica. Cinzas predominantemente amorfas, podem ser aplicadas como pozolanas em matrizes cimentícias (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; BAHURUDEEN et al., 2014), pois apresentam maior reatividade. Cinzas predominantemente cristalinas, apresentam maior eficiência quando aplicadas como material inerte (ALMEIDA et al., 2015; SALES; LIMA, 2010). Na Tabela 2 está apresentado um quadro sinóptico no qual é possível verificar um levantamento das pesquisas realizadas com a utilização do resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes cimentícias.

Tabela 2- Sinopse das pesquisas relacionadas ao resíduo da queima do bagaço da cana.

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo da pesquisa</b>	<b>Foco da aplicação</b>	<b>Principais conclusões</b>
(GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007)	Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material	Avaliar a potencialidade da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como um material suplementar por meio de ensaios físicos e mecânicos	Pozolana	A substituição de até 20% de cimento pela cinza não gerou efeito adverso para o concreto. Os concretos apresentaram alta resistência inicial, menor permeabilidade e melhor resistência à penetração e difusão de cloretos
(CORDEIRO et al., 2008)	Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars	Investigar os efeitos químicos e físicos da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas	Pozolana	Quanto mais fino material, melhor a densidade de empacotamento, a resistência e a reatividade
(AKRAM; MEMON; OBAID, 2009)	Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash	Avaliar a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como modificador de viscosidade no concreto auto adensável	Modificador de viscosidade	É possível produzir um concreto de menor custo por meio da incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar
(CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009a)	Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars	Verificar a resistência à compressão e a resistência a penetração de sulfatos de argamassas produzidas com cinzas do bagaço de cana com diferentes valores de perda ao fogo em substituição ao cimento	Pozolana	O teor de substituição do cimento pela cinza apresentou maior efeito nas propriedades do concreto do que a perda ao fogo. As argamassas produzidas com cinzas contendo altos teores de perda ao fogo não apresentaram efeitos adversos nas propriedades analisadas. Cinzas com baixa perda ao fogo (menor que 10%) apresentaram excelentes propriedades pozolânicas
(CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009b)	Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete	Verificar a resistência à compressão, a permeabilidade e o calor de hidratação de concretos produzidos com a cinza de bagaço de cana em substituição ao cimento	Pozolana	O teor ótimo de substituição do cimento pela cinza foi 20%. O concreto produzido apresentou maior resistência e menor permeabilidade de água

Tabela 2- Sinopse das pesquisas relacionadas ao resíduo da queima do bagaço da cana.

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo da pesquisa</b>	<b>Foco da aplicação</b>	<b>Principais conclusões</b>
(CORDEIRO et al., 2009)	Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete	Avaliar a influência da moagem nas características da cinza, tais como, tamanho das partículas, área superficial específica e atividade pozolânica	Pozolana	Cinzas com partículas D80 (80%) abaixo de 60 µm e superfície específica blaine acima de 300 m <sup>2</sup> /kg podem ser classificadas como pozolana. Concretos produzidos com teores de 20% de cinza apresentaram propriedades mecânicas similares ao concreto referencia, melhores propriedades reológicas e maior resistência a penetração de íons cloreto
(CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009)	Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash	Estudar a reatividade de cinzas calcinadas em diferentes temperaturas com diferentes teores de sílica e carbono	Pozolana	A temperatura de calcinação é um parâmetro importante para a produção de cinzas com adequada atividade pozolânica. Cinzas produzidas com temperatura de 600°C durante 3 h, com uma taxa de aquecimento de 10 C / min apresentaram em sua composição sílica amorfa, baixo teor de carbono e elevada área superficial específica
(SALES; LIMA, 2010)	Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement	Verificar o potencial aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar proveniente de diferentes usinas em substituição ao agregado miúdo na produção de concretos e argamassas	Agregado	As cinzas das usinas J e A apresentaram características similares a areia natural e estrutura predominantemente cristalina. Argamassas produzidas com teores de 20% e 30% de substituição da areia pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram resistência a compressão superiores ao concreto de referência
(MALDONADO-BANDALA et al., 2011)	Electrochemical characterization of modified concretes with sugar cane bagasse ash	Estudar a corrosão de armaduras de concretos produzidos com a cinza em substituição ao cimento por meio do potencial de corrosão e resistência a polarização	Pozolana	O concreto produzido com 80% de cinza apresentou melhor proteção contra a corrosão das armaduras.
(LIMA et al., 2011)	Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão	Avaliar a durabilidade de concretos produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição a areia por meio de ensaios de carbonatação e abrasão	Agregado	A carbonatação e abrasão dos concretos produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar são similares ao concreto de referência

Tabela 2- Sinopse das pesquisas relacionadas ao resíduo da queima do bagaço da cana.

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo da pesquisa</b>	<b>Foco da aplicação</b>	<b>Principais conclusões</b>
(FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011)	Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture	Caracterizar cinzas e verificar a potencialidade de utilização das mesmas como pozolanas	Pozolana	As cinzas apresentaram baixa atividade pozolânica possivelmente devido a contaminação das mesmas pelo solo da lavoura
(RUKZON; CHINDAPRASIRT, 2012a)	Utilization of bagasse ash in high-strength concrete	Utilizar a cinza como pozolana na produção de concreto de alta resistência	Pozolana	A utilização de 30% de cinza em substituição ao cimento reduz a penetração de cloretos e melhora a resistência dos concretos
(MODANI; VYAWAHARE, 2013)	Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete	Analisar o comportamento de concretos produzidos com diferentes teores de CBC em substituição ao agregado natural. Foram verificadas as propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido	Agregado	A substituição da areia pela cinza resultou na perda de trabalhabilidade e maior permeabilidade dos concretos. Apenas o concreto produzido com 10% de cinza apresentou resistência a compressão superior ao concreto de referência
(SUA-IAM; MAKUL, 2013a)	Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste	Verificar a interação entre o filler calcário e a cinza do bagaço da cana de açúcar como agregado miúdo em concreto auto adensável	Agregado	A incorporação de 20% de calcário e 20% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar melhorou a trabalhabilidade e as propriedades no estado endurecido do concreto auto adensável
(MONTAKARNTIWONG et al., 2013)	Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry	Estudar a resistência à compressão e evolução de calor de hidratação de concretos produzidos com a cinza do bagaço da cana de açúcar	Pozolana	A cinza natural (sem moagem) não apresentou propriedades pozolânicas adequadas. Após moagem, os concretos produzidos com 20% e 30% de cinza atingiram, aos 7 dias, 94% da resistência do concreto de referência. Os concretos produzidos com a cinza apresentaram menor liberação de calor no processo de hidratação, a diferença de temperatura (comparando com o concreto referência) foi de 1°C para o concreto com 20% de cinza e de 3°C para o concreto com 40% de cinza

Tabela 2- Sinopse das pesquisas relacionadas ao resíduo da queima do bagaço da cana.

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo da pesquisa</b>	<b>Foco da aplicação</b>	<b>Principais conclusões</b>
(JIMÉNEZ-QUERO et al., 2013)	Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars	Investigar os efeitos da cinza do bagaço da cana de açúcar e da cinza volante nas propriedades reológicas de pastas e argamassas	Adição mineral	A utilização da cinza resultou na obtenção de pastas mais viscosas, quanto maior o teor de cinza adicionado a mistura, maior a tensão de escoamento
(BAHURUDEEN et al., 2014)	Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers	Verificar a compatibilidade de diferentes aditivos em pastas de cimento produzidas com diferentes teores de substituição do cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar	Pozolana	Os aditivos a base de éter policarboxilato são mais compatíveis com a cinza de bagaço da cana-de-açúcar quando comparados aos aditivos a base de naftaleno sulfonado
(ALMEIDA et al., 2014)	Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concretos com a ACBC por meio de medidas de potencial de circuito aberto	Avaliar a potencialidade da ocorrência de corrosão de armaduras em concretos produzidos com a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) em substituição parcial ao agregado miúdo.	Agregado	A ACBC pode diminuir a probabilidade de corrosão devido ao retardo da despassivação da armadura
(SALES et al., 2014)	Durabilidade potencial de argamassas com ACBC por meio da avaliação da frente de carbonatação e penetração de cloretos	Verificar a durabilidade de argamassas produzidas com a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial da areia natural por meio de ensaio de carbonatação acelerada e penetração de cloretos.	Agregado	As argamassas produzidas com a ACBC (teores de 30% e 50%) apresentaram redução da penetração de cloretos quando comparada a argamassa de referência (sem ACBC). A profundidade de carbonatação das argamassas com 0% e 30% de ACBC foram similares
(BAHURUDEEN et al., 2015)	Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete	Investigar a influência da substituição do cimento por diferentes teores de cinza do bagaço da cana-de-açúcar na resistência à compressão, calor de hidratação, retração e durabilidade de concretos	Pozolana	Os concretos produzidos com a cinza em substituição ao cimento apresentaram redução do calor de hidratação, aumento de resistência à compressão, redução significativa na permeabilidade e retração por secagem similar ao concreto de referência

Tabela 2- Sinopse das pesquisas relacionadas ao resíduo da queima do bagaço da cana.

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo da pesquisa</b>	<b>Foco da aplicação</b>	<b>Principais conclusões</b>
(BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015)	Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash	Investigar o efeito de diferentes métodos de processamento na atividade pozolânica e microestrutura da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, com objetivo de sugerir uma metodologia de processamento adequado para a obtenção de cinzas com a máxima atividade pozolânica e mínimo processamento e gasto energético	Pozolana	A temperatura de calcinação de 700°C se mostrou mais eficiente para a produção de cinzas com elevada atividade pozolânica. As cinzas com partículas inferiores a 53µm apresentaram propriedades adequadas para serem classificadas como material suplementar
(ALMEIDA et al., 2015)	Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar	Avaliar o uso da cinza como agregado miúdo para a produção de argamassas	Agregado	As argamassas produzidas com 30% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição a areia natural apresentaram melhores propriedades mecânicas e maior resistência à penetração de cloretos
(MORETTI et al., 2016)	Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete	Avaliar o potencial da aplicação conjunta do resíduo de construção civil e da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição aos agregados naturais na produção de concretos.	Agregado	Concretos produzidos com o uso conjunto dos resíduos atingiram 93% da resistência do concreto de referência. A incorporação dos resíduos levou a um aumento na demanda de água na mistura. O uso de 50% de RCD reduziu o módulo de elasticidade dos concretos.
(ARIF; CLARK; LAKE, 2017)	Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete	Verificar os efeitos da utilização da cinza pesada do bagaço da cana-de-açúcar em substituição do agregado miúdo na trabalhabilidade, resistência, penetrabilidade de cloretos, retração por secagem e resistência ao ataque de ácidos.	Agregado	As cinzas provenientes das caldeiras de cogeração podem ser utilizadas como fíler na produção de concretos. O incremento no teor de cinza reduz a trabalhabilidade, aumenta a resistência à compressão, reduz a retração por secagem e aumenta a resistência ao ataque de ácidos.

A maior parte das pesquisas focam na aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como pozolana em matrizes cimentícias. Entretanto, são necessários tratamentos térmicos e moagem para conferir reatividade a essas cinzas. Além disso, alguns pesquisadores realizam a lavagem do bagaço para retirar o quartzo impregnado, e desta forma, melhorar a reatividade do material. Por outro lado, cinzas contendo grande quantidade de quartzo podem ser aplicadas como agregado miúdo ou fíler na produção de concretos e argamassas. Os trabalhos realizados por Almeida et al. (2015), Arif et al. (2017), e Sales & Lima (2010) mostram que os concretos e argamassas produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial da areia apresentaram bons resultados de propriedades físicas e mecânicas. Além disso, Almeida (2013) constatou que a incorporação da cinza pode diminuir a probabilidade de corrosão devido ao retardo na despassivação da armadura.

Dentro desse contexto, esse trabalho buscou dar continuidade aos estudos desenvolvidos pelo grupo GESEC (ALMEIDA et al., 2015; MORETTI et al., 2016; SALES; LIMA, 2010) através da aplicação da cinza contendo grande quantidade de quartzo em substituição parcial do agregado miúdo. O material utilizado foi nomeado como areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) (ALMEIDA et al., 2015) e o estudo foi realizado na fase argamassa. Esse estudo foi realizado na fase argamassa com o intuito de reduzir as variáveis e explorar melhor o efeito da incorporação da ACBC na porosidade, transporte de agentes agressivos, e também na passivação do aço.

## **2.2 Matriz Cimentícia**

Neste capítulo será feita uma breve apresentação sobre os principais aspectos da microestrutura da matriz cimentícia, abrangendo a fase sólida (produtos de hidratação), a fase líquida (solução intrínseca dos poros) e a fase porosa (tipos de poros).

### **2.2.1 Fase sólida**

O concreto é composto basicamente por cimento, agregados, adições, aditivos e água. O cimento é o elemento responsável por aglomerar as partículas e ligá-las por meio da formação de produtos hidratados (CINCOTTO, 2014). Esse material é composto basicamente por clínquer, sulfato de cálcio e adições (fíler, pozolanas, ecórias). O clínquer é um material polifásico que possui em sua composição silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico. Quando disperso em água, o sulfato de cálcio e compostos de cálcio são dissolvidos e a solução fica saturada

com diversas espécies iônicas. Dentro de poucos minutos ocorre a interação dos íons hidroxila com o cálcio, aluminatos, e sulfatos, promovendo a formação do primeiro composto hidratado (etringita), que são cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado. Após algumas horas são formados grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (portlandita, CH) e pequenos hidratos de silicato de cálcio (C-S-H). Dependendo da relação alumina-sulfato do cimento, após alguns dias do início da hidratação, a etringita pode se tornar instável, reagir e formar o monossulfoaluminato hidratado (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006).

O principal produto de hidratação de uma pasta de cimento é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Esse sólido é responsável pela resistência e durabilidade ao longo do tempo, e compõe de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento. O C-S-H não é um composto bem definido, pois sua relação Ca/Si e o conteúdo de água variam, impactando assim na sua morfologia. O C-S-H pode se apresentar desde a forma de fibras pouco cristalinas até rede reticulares (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006).

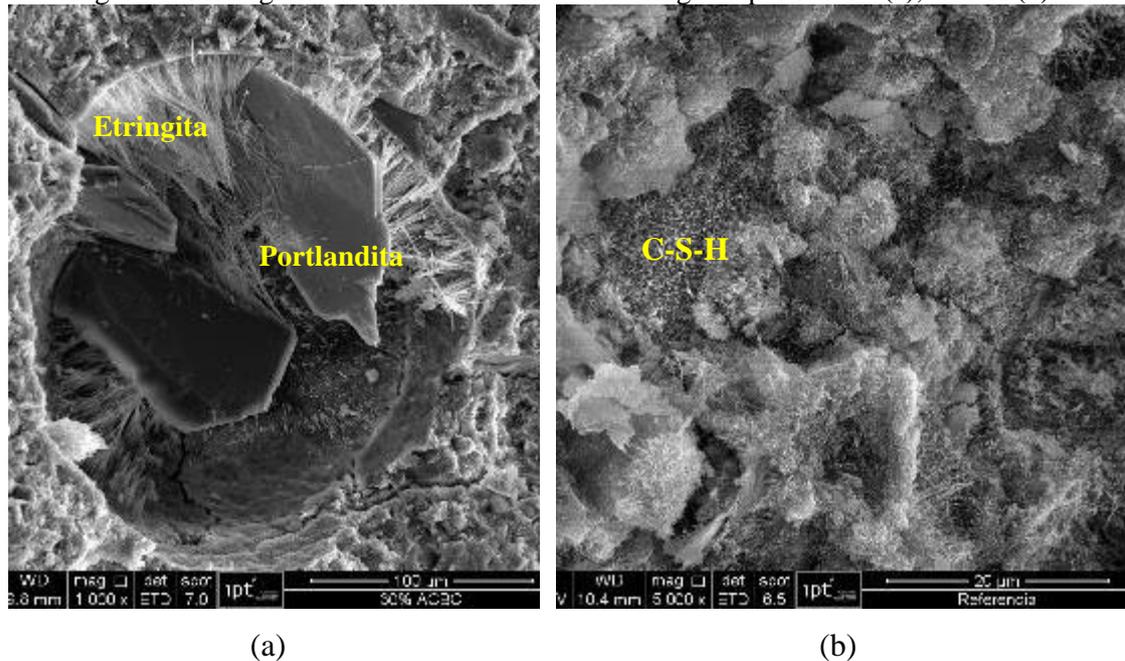
A portlandita, diferente do C-S-H, é um produto de hidratação de estequiometria definida,  $\text{Ca(OH)}_2$ . Compõe de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento e possui morfologia de placas hexagonais empilhadas. Esse composto possui área superficial menor que o C-S-H e contribui pouco para a resistência da matriz (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006).

A etringita ocupa de 15 a 20% do volume sólido de uma pasta de cimento e possui papel secundário na microestrutura e propriedades da matriz. Se apresenta como cristais prismáticos aciculares podendo reagir e se transformar em monossulfato hidratado, o qual vulnerabiliza a matriz ao ataque por sulfatos. (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006).

Na Figura 3 pode-se visualizar a morfologia dos principais produtos de hidratação do cimento, a etringita, portlandita (CH) e o C-S-H.

Além dos produtos de hidratação podem ser encontrados grãos anidros de cimento na microestrutura. Durante o processo de hidratação, as partículas de menor dimensão se dissolvem primeiro e as partículas maiores são reduzidas. Devido a limitação de espaço, os produtos de hidratação podem precipitar nas partículas de cimento em hidratação, dificultado assim o processo de hidratação do grão. (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006).

Figura 3- Micrografia eletrônica de varredura: etringita e portlandita (a), C-S-H (b).



Fonte: Próprio autor

### 2.2.2 Fase líquida

Segundo Mehta & Monteiro (2006), a água está presente na microestrutura da pasta de cimento hidratada em quatro formas, a saber:

- Água adsorvida: água que está próxima da superfície sólida dos produtos de hidratação. Até seis camadas moleculares de água (15 angstroms) podem ser retidas por pontes de hidrogênio e permanecerem fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos da pasta. Parte da água adsorvida pode ser liberada quando exposta a ambiente onde a umidade relativa esteja abaixo de 30%, nessa condição ocorre a retração da pasta.
- Água interlamelar: água associada a estrutura do C-S-H, essa água é perdida apenas em condições onde a umidade relativa for abaixo de 11%. Nessas condições a estrutura do C-S-H retrai consideravelmente.
- Água quimicamente combinada: água que compõe a microestrutura dos produtos de hidratação. Essa água só é perdida se os produtos de hidratação sofrerem decomposição por aquecimento.
- Água capilar: presente nos vazios maiores que 50 angstroms, é a água que está livre das influências das forças de atração das fases sólidas. Pode-se dividir esse tipo de água em duas categorias, a água livre e a água retida por tensão capilar. A água livre está presente nos grandes vazios (> 0,05

$\mu\text{m}$ ) e sua remoção não provoca retração na matriz, por outro lado, a remoção da água retida por tensão capilar provoca retração do sistema. A água capilar também é nomeada por “água de poro”.

A água de poro é uma solução iônica composta predominantemente pelos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$ . A composição e concentração dessa solução varia de acordo com o tipo de cimento, agregados, adições, aditivos, quantidade de água de amassamento, grau de hidratação da matriz, e também o meio externo. Essa água livre pode reagir com espécies químicas externas que venham a penetrar no concreto, com os produtos hidratados e com os grãos anidros (OLIVEIRA; AGOPYAN, 2000). A composição química da água de poro é um fator que influencia grandemente a passivação e corrosão do aço no interior do concreto. Visto isso, o pH é uma característica muito importante na água de poro, pois a alcalinidade da solução é responsável por passivar o aço e manter essa proteção ao longo do tempo. Além do pH, a condutividade elétrica da solução é outra propriedade muito importante, pois a mesma está relacionada com a mobilidade iônica na solução, quanto maior a condutividade, maior a facilidade de ocorrência de processos corrosivos.

### 2.2.3 Fase porosa

A porosidade interfere diretamente na resistência mecânica, módulo de elasticidade, retração, propriedades térmicas e durabilidade. Na pasta de cimento são encontrados vários tipos de poros, os quais influenciam de maneira diferente nas propriedades, são eles (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006):

- Poros gel ou entre camadas de C-S-H: Vazios muito pequenos dentro da estrutura do C-S-H, representando 28% dos produtos sólidos do C-S-H. Tem uma largura entre 5 a 25 Å. Devido ao tamanho de poro pequeno, acaba não tendo efeito adverso sobre a resistência e permeabilidade da pasta de cimento hidratado. No entanto, certas condições podem contribuir para a retração por secagem e fluência.
- Vazios capilares: Representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratado. Estes vazios dependem da relação água/cimento. Em pastas bem hidratadas, de baixa relação a/c, os espaços vazios capilares podem variar de 10 a 50 nm, em pastas de alta relação a/c, nas primeiras idades de hidratação, os espaços vazios capilares podem ser tão grandes como de 3 a 5 mm.

- Poros de ar incorporado: Vazios de ar são geralmente esféricos. Podem ser decorrentes do ar que fica preso na pasta durante a mistura (3 mm) ou terem sido intencionalmente incorporados (50 e 200  $\mu\text{m}$ ).

A classificação dos poros segundo Mindess et al. (2003) está apresentada na Tabela 3.

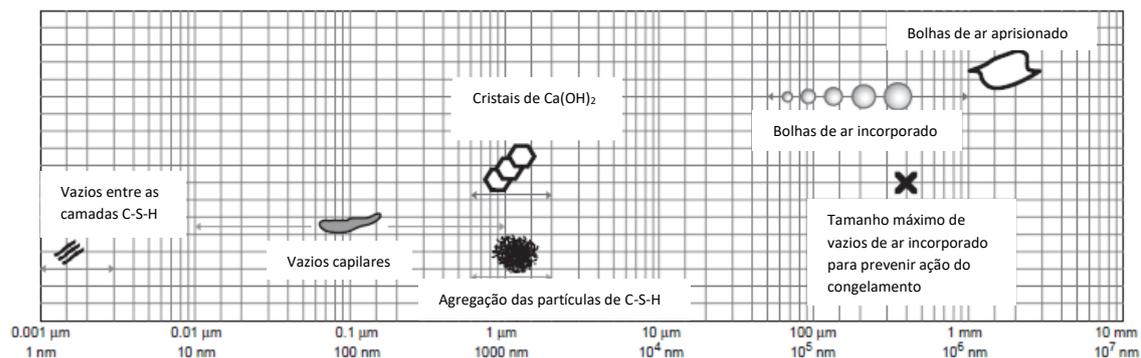
Tabela 3- Classificação da porosidade de pastas cimentícias.

Classificação	Diâmetro	Descrição
<i>Vazios capilares</i>	10000 – 50 nm	Capilares longos (macroporos)
	50 – 10 nm	Capilares médios (longos mesoporos)
<i>Poros gel</i>	10 – 2,5 nm	Capilares pequenos isolados (pequenos mesoporos)
	2,5 – 0,5 nm	Microporos
	$\leq 0,5$ nm	Espaços entre camadas

Fonte: Mindess et al. (2003)

A dimensão dos poros da pasta de cimento é muito variável, pois existem poros muito pequenos, da ordem de 1 nm, e poros grandes, da ordem de 107 nm, como pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4- Porosidade da pasta de cimento.



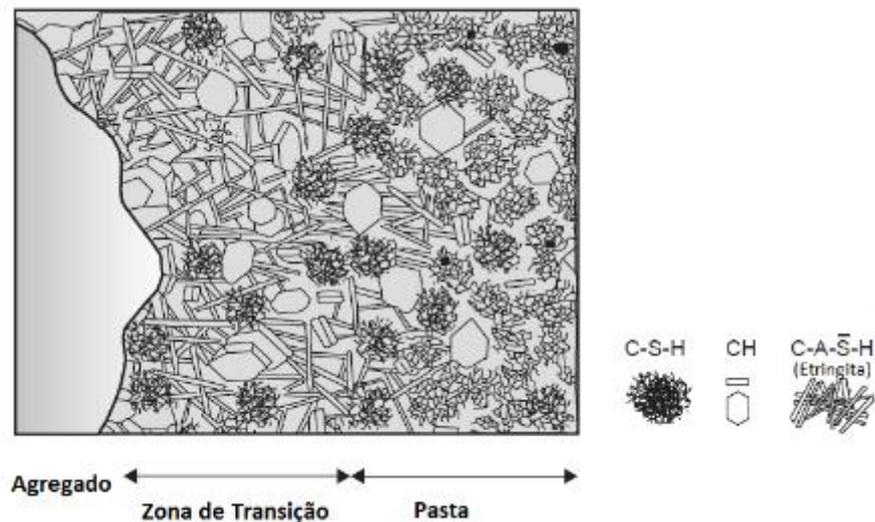
Fonte: Mehta & Monteiro (2006).

Segundo Mindess et al. (2003), as dimensões dos poros influenciam nas propriedades do material, como pode ser verificado abaixo:

- Macroporos: Permeabilidade, difusividade.
- Longos mesoporos: Permeabilidade (em ausência de macroporos), retração.
- Pequenos mesoporos: Retração.
- Microporos: Retração, fluência (deformação a longo tempo).

Na argamassa e no concreto há uma formação adicional de poros de grande tamanho comparado com os poros de uma pasta de cimento e estes longos poros estão presentes apenas na interface entre o agregado e a pasta de cimento (WINSLOW; LIU; LAFAYETTE, 1990). Filmes de água se formam em torno das partículas de agregado no concreto fresco contribuindo com a formação de produtos cristalinos maiores e mais porosos. Na Figura 5, pode ser visualizada uma representação esquemática da zona de transição entre o agregado e a matriz da pasta de cimento (MEHTA, P. K., MONTEIRO, 2006).

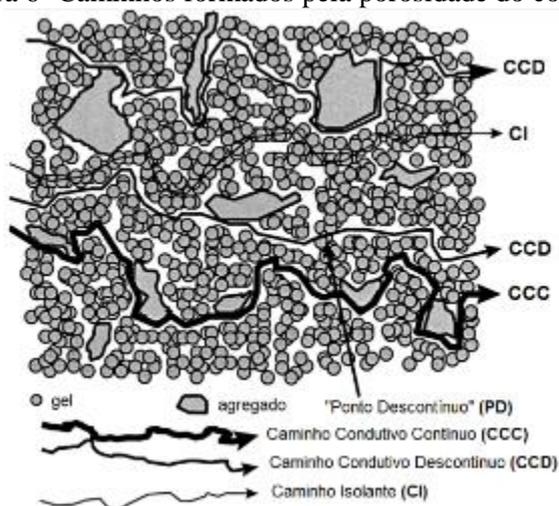
Figura 5- Zona de transição do agregado e pasta de cimento



Fonte: Mehta & Monteiro (2006)

Vale salientar que não basta conhecer apenas o volume total de poros, mas também é necessário conhecer a distribuição dos tamanhos dos poros, assim como a interconectividade entre eles. Um poro isolado não produz efeito maléfico, mas, poros interconectados formam caminhos por onde os agentes agressivos podem percorrer e afetar as propriedades do material. Na Figura 6, pode ser verificado um modelo proposto por (GUANGLING, 2000) dos tipos de “caminhos” formados pela porosidade do concreto. Segundo o autor, existem caminhos condutivos contínuos, descontínuos, caminhos isolantes e pontos de descontinuidade.

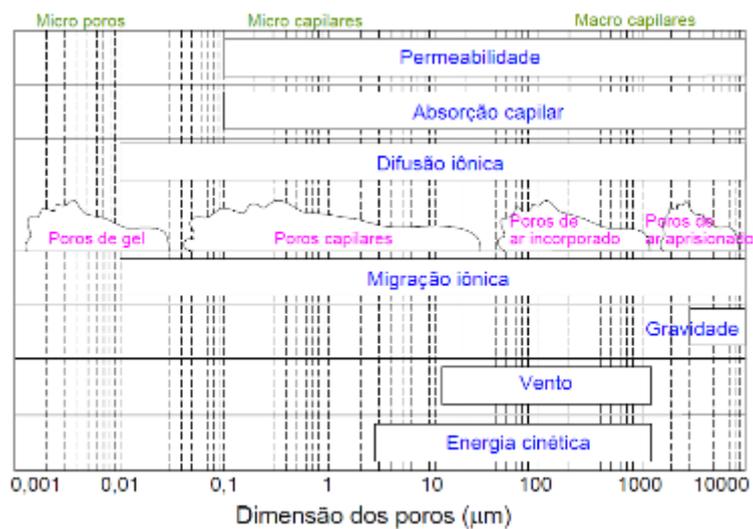
Figura 6- Caminhos formados pela porosidade do concreto.



Fonte: adaptado Guangling (2000).

A dimensão dos poros tem grande influência nos fenômenos de transporte no interior do concreto. Pode-se observar na Figura 7 as dimensões dos poros e os principais fenômenos de transporte correspondentes.

Figura 7- Dimensão de poros e principais mecanismos de transporte.



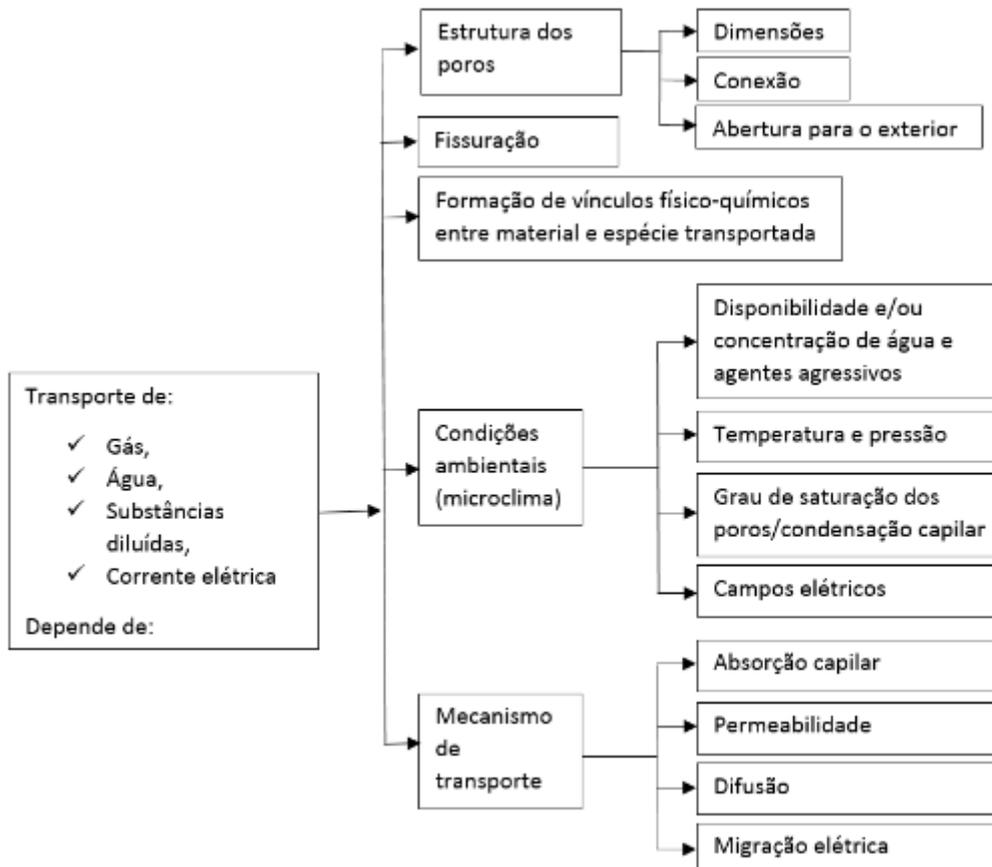
Fonte: Helene (1993)<sup>1</sup> apud Silva (2006).

<sup>1</sup>HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

## 2.3 Mecanismos de transporte em matrizes cimentícias

Diversos são os fatores envolvidos nos mecanismos de transporte em materiais porosos, os quais podem ser verificados na Figura 8 (BERTOLINI, 2010). Vale salientar que a degradação do material está diretamente relacionada com a facilidade/dificuldade de transporte das substâncias deletérias em seu interior.

Figura 8- Principais fatores envolvidos nos fenômenos de transporte no interior dos materiais porosos.



Fonte: Bertolini (2010).

Os principais mecanismos de transporte no concreto são: a absorção capilar, a permeabilidade, a difusão e a migração. Esses mecanismos estão descritos a seguir.

### 2.3.1 Absorção capilar

A absorção capilar ocorre imediatamente após o contato superficial do líquido com o substrato devido às tensões capilares. Nos materiais hidrófilos, os líquidos são atraídos para o interior do poro, ocorrendo a ascensão do líquido através do material. Essa

pressão que provoca a ascensão capilar pode ser calculada pela equação de Laplace-Washburn (BERTOLINI, 2010):

$$P_{cap} = \frac{2\sigma \times \cos\theta}{r}$$

Equação 1

Onde:  $\sigma$  é a tensão superficial da água ( $7,2 \cdot 10^{-2}$  N/m a  $25^\circ\text{C}$ ),  $\theta$  é o ângulo de contato entre o líquido e as paredes do poro e  $r$  é o raio do poro capilar. Quanto menor a dimensão do poro, maior o valor de  $P_{cap}$ . A pressão capilar gera um fluxo de água no interior do capilar, e a velocidade desse fluxo pode ser calculada pela equação de Poiseuille (BERTOLINI, 2010):

$$v = \frac{\Delta P \times r^2}{8\mu \times l}$$

Equação 2

Onde:  $\mu$  é a viscosidade da água ( $10^{-3}$  N.s/m<sup>2</sup> a  $25^\circ\text{C}$ ),  $l$  é o comprimento do capilar. Ao considerar um fluxo horizontal, desconsidera-se o efeito da gravidade ( $\Delta P = P_{cap}$ ), então a velocidade do fluxo do líquido em  $x$  é dado pela seguinte equação (BERTOLINI, 2010):

$$v = \frac{P_{cap} \times r^2}{8\mu \times x} = \frac{2\sigma \times \cos\theta \times r}{8\mu \times x}$$

Equação 3

Ao resolver a equação 3 resulta-se em:

$$x = \left( \frac{\sigma \times \cos\theta \times r}{2\mu} \right)^{0,5} \times \sqrt{t} = k_{cap} \times \sqrt{t}$$

Equação 4

O coeficiente  $k_{cap}$  é a constante de proporcionalidade entre a profundidade de absorção em  $x$  e a raiz quadrada do tempo. Por meio dessa equação é possível calcular a quantidade de água absorvida por uma área unitária do capilar em função do tempo (BERTOLINI, 2010):

$$i(t) = x(t) \times \delta = (\delta \cdot K_{cap}) \times \sqrt{t} = S \times \sqrt{t}$$

Equação 5

Onde:  $\delta$  é a densidade da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e o parâmetro  $S$  é o coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de sortividade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ ) (BERTOLINI, 2010).

A porosidade das matrizes cimentícias é composta por um sistema complexo com poros de diferentes dimensões e tortuosidades, e desta forma, não é possível analisar os poros de maneira individualizada como demonstram as equações anteriormente. No entanto, é possível analisar o comportamento global do material por meio do coeficiente de absorção capilar.

### 2.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida pela aptidão do material em permitir a passagem de um fluido, quando sujeito a um gradiente de pressão (OLLIVIER, J. P., TORRENTI, 2014). A vazão desse fluido irá percorrer pela porosidade aberta interconectada, e essa vazão pode ser calculada pela equação de Darcy:

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{d_p}{d_x}$$

Equação 6

Onde:

$Q$  = vazão volumétrica

$k$  = permeabilidade

$\mu$  = viscosidade do fluido

$A$  = seção aparente do material

$d_p$  = diferença de pressão

$d_x$  = espessura atravessada do material

Por meio dessa equação considera-se que o regime de escoamento é laminar e que o fluido é inerte em relação ao material. Dessa forma, a lei de Darcy não se aplica corretamente aos materiais cimentícios pois o escoamento que ocorre no interior dos poros não é laminar (OLLIVIER, J. P., TORRENTI, 2014).

Como a permeabilidade dos concretos é baixa, uma maneira de facilitar a medida é através da utilização de gases, pois são fluidos de baixa viscosidade. Vale salientar que é necessário controlar a umidade do corpo de prova pois a permeabilidade ao gás varia muito com o grau de saturação do material. Sendo assim, as condições experimentais para medir a permeabilidade devem ser devidamente controladas para que seja possível realizar comparações entre diferentes matrizes cimentícias (OLLIVIER, J. P., TORRENTI, 2014).

Sabe-se que a vazão no interior de um material cimentício é resultado do escoamento dentro de uma rede de poros, ou seja, a permeabilidade do material depende de sua estrutura porosa. Diversas pesquisas buscam prever a permeabilidade por meio da descrição da estrutura porosa do material (OLLIVIER, J. P., TORRENTI, 2014).

O modelo criado por Katz & Thompson (1986) relaciona os valores de diâmetro crítico ( $d_c$  – diâmetro correspondente ao valor limite de penetração do mercúrio no ensaio de porosimetria), condutividade elétrica da solução de água de poros ( $\sigma_s$ ) e a condutividade elétrica do concreto saturado ( $\sigma_{ms}$ ) para estimar a permeabilidade intrínseca do material ( $k$ ), como pode ser verificado na equação abaixo:

$$k = \frac{d_c^2}{226 \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_{ms}} \right)}$$

Equação 7

### 2.3.3 Difusão

A difusão ocorre pelo efeito do gradiente de concentração existente entre uma região e outra, ou seja, uma substância existente em uma região com concentração mais elevada tende a se mover para a região onde a substância é menos concentrada. Na primeira lei de Fick (Equação 8), o fenômeno da difusão foi descrito em condições de fluxo estacionário e unidirecional.

$$F = -D \frac{dC}{dx}$$

Equação 8

Onde:

$F$  = fluxo (constante no tempo) da espécie que se difunde (kg/(m<sup>2</sup>.s))

$C$  = concentração da espécie que se difunde (kg/m<sup>3</sup>)

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

$x$  = direção da difusão (fluxo unidirecional)

A difusão de gases é mais rápida quando os poros estão preenchidos por ar, uma vez que a difusão em meio aquoso é de 4 a 5 ordens de grandeza inferior à da difusão no ar. Por outro lado, a difusão de espécies iônicas só ocorre em meio aquoso, e é mais eficaz nos poros saturados do que nos poros parcialmente preenchidos por água (BERTOLINI, 2010).

A difusão ocorre gradualmente através da espessura do material, ou seja, o fluxo não é constante. Sendo assim, na segunda lei de Fick, considera-se fluxo não estacionário (Equação 9).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Equação 9

Em algumas aplicações, considera-se que a concentração da espécie que se difunde é constante (C), que o material é homogêneo, ou seja, D também é constante, e que inicialmente não contém cloretos (C=0 para x>0 e t=0) (BERTOLINI, 2010). Dessa forma, obtém-se a Equação 10.

$$\frac{C}{C_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)$$

Equação 10

### 2.3.4 Migração

O transporte das espécies iônicas pode ocorrer devido à diferença de potencial produzida pelo campo elétrico entre dois pontos do material. Há uma migração dos íons, onde os íons positivos migram no sentido do fluxo da corrente, e os negativos no sentido contrário. O número de transporte de uma espécie iônica (j) é definido como a contribuição que o íon j dá ao transporte da corrente, e esse número de transporte ( $t_j$ ) é proporcional à sua concentração na solução e à velocidade do íon sob a ação de um campo elétrico unitário (Equação 11) (BERTOLINI, 2010).

$$t_j = i_j / I_{tot} = z_j^2 \cdot c_j \cdot u_j / \sum (z_j^2 \cdot c_j \cdot u_j)$$

Equação 11

Onde:

$i_j$ = corrente transportada por j;

$I_{tot}$ = corrente total da solução;

$z_j$ = carga de íon j;

$c_j$ = concentração de íon j;

$u_j$ = velocidade do íon sobre um campo elétrico unitário.

A resistividade elétrica é um parâmetro que está correlacionado com a migração elétrica. A resistividade de uma solução depende das espécies iônicas presentes e da concentração dessas espécies. No caso dos materiais cimentícios, o movimento das espécies iônicas ocorre quando os poros estão saturados de água (BERTOLINI, 2010).

## 2.4 Adições minerais

A NBR 11172:1990 (ABNT, 1990) define adições como “Produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características”. As adições podem melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco, a resistência e a durabilidade.

As adições minerais são divididas em dois grupos, as quimicamente ativas e as sem atividade química. As quimicamente ativas são os materiais pozolânicos e os materiais cimentantes e as adições sem atividade química são conhecidas como fílers (TUTIKIAN, B. F., DAL MOLIN, 2008).

Materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes (ABNT, 2014a). Materiais cimentantes, como a escória de alto forno, formam compostos hidratados através da reação com o cálcio existente na fase vítrea do próprio material (CINCOTTO, 2014). Na Tabela 4 estão apresentados exemplos de materiais pozolânicos e cimentantes, bem como a composição química e mineralógica e as características da partícula segundo Mehta e Monteiro (2006).

O fíler é um material com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, quando adicionado aos concretos, atuam melhorando suas propriedades, tais como: a trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação, ou tendência à fissuração (NEVILLE, 1997). São materiais que não apresentam reatividade, agindo pelo efeito físico de empacotamento das partículas e formação de pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (TUTIKIAN, B. F., DAL MOLIN, 2008). Esse material melhora a estrutura porosa da matriz, os poros maiores diminuem e a quantidade de poros menores aumenta. Esses efeitos podem contribuir com o aumento da resistência e da durabilidade do concreto (MOOSBERG-BUSTNES, 2004).

Tabela 4- Classificação das adições minerais.

Classificação	Composição química e mineralógica	Características da partícula
<b>Cimentantes e pozolânicas</b>		
Escória granulada de alto forno (cimentante)	Constituída predominantemente por silicato vítreo, contendo principalmente, cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Componentes cristalinos do grupo melilita podem estar presentes em pequenas quantidades	O material não processado possui dimensão da areia e contém de 10 a 15% de umidade. Antes de ser utilizado, é seco e triturado em partículas menores que 45µm (área específica blaine em torno de 500m <sup>2</sup> /kg). As partículas têm textura áspera
Cinzas volantes com alto teor de cálcio (cimentantes e pozolânicas)	Constituída predominantemente por silicato vítreo, contendo principalmente, cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. A pequena quantidade de material cristalino presente geralmente consiste em quartzo e C3A, cal livre e periclásio podem estar presentes; CS e C4A3S podem estar presentes no caso de carvões com alto teor de enxofre. O carbono não queimado é menor que 2%.	O pó corresponde a 10-15% de partículas maiores de 45µm (normalmente 300-400 m <sup>2</sup> /kg Blaine). A maioria das partículas são esféricas sólidas com diâmetro menor que 20µm. A superfície da partícula normalmente é lisa, mas não tão limpa como as cinzas volantes com baixo teor de cálcio.
<b>Pozolanas altamente reativas</b>		
Sílica ativa condensada	Consiste essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina.	Pó extremamente fino, consistindo em esferas sólidas de 0,1µm de diâmetro médio (área superficial específica de cerca de 20 m <sup>2</sup> /g, por adsorção de nitrogênio)
Cinza da casca de arroz	Consiste essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina.	As partículas normalmente são menores do que 45µm, mas são altamente celulares (área superficial específica de 40 a 60 m <sup>2</sup> /g, por adsorção de nitrogênio)
<b>Pozolanas comuns</b>		
Cinza volante com baixo teor de cálcio	Constituída predominantemente por silicato vítreo contendo alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste em quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.	O pó corresponde a 10-15% de partículas maiores de 45µm (normalmente 200-300 m <sup>2</sup> /kg Blaine). A maioria das partículas são esféricas sólidas com diâmetro médio de 20µm. Cenosferas e plerosferas podem estar presentes.
Materiais naturais	Além de vidro de aluminossilicato, as pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato e mica.	As partículas são moídas a menos de 45µm e têm textura áspera.
<b>Pozolanas pouco reativas</b>		
Escória de alto forno resfriada lentamente, cinzas de forno, escória de caldeira, palha de arroz queimada em campo.	Consistem essencialmente de materiais de silicato cristalino e apenas uma quantidade pequena de matéria não-cristalina.	Os materiais devem ser pulverizados em partículas de dimensões muito finas para desenvolver alguma atividade pozolânica. As partículas moídas são de textura áspera.

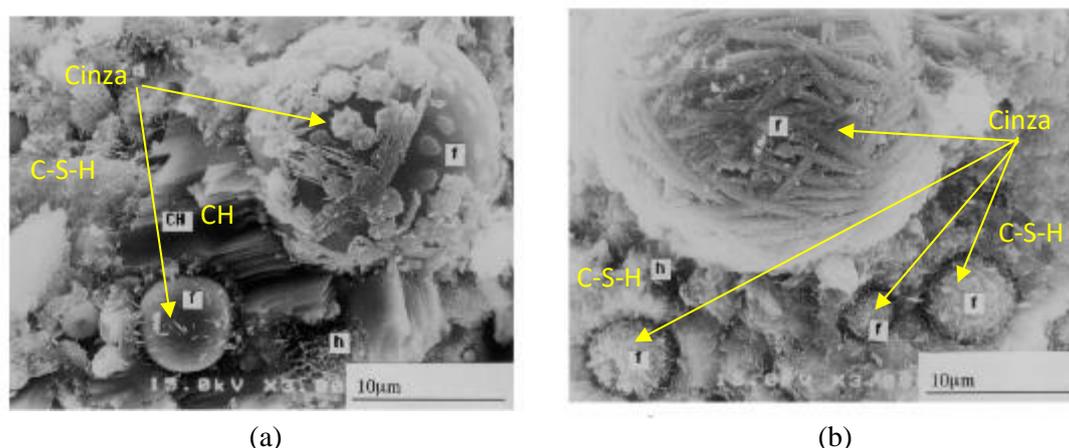
Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

A pozolana, quando incorporada ao material cimentício reage com o hidróxido de cálcio para formar o C-S-H secundário. Considerando que essa reação é lenta, as taxas

de liberação de calor e desenvolvimento de resistência também são lentas, no entanto, os produtos da reação pozolânica são eficientes para preencher espaços capilares aumentando, assim, a impermeabilidade do sistema. Na microestrutura de uma pasta hidratada com pozolana, é possível identificar C-S-H de baixa densidade e menor relação Ca/Si ocupando vazios capilares. Esse C-S-H é fruto da reação do hidróxido de cálcio com a pozolana (HANEHARA et al., 2001).

Na Figura 9 estão apresentadas duas micrografias de uma pasta produzida com cinza volante. A primeira imagem refere-se a pasta com idade de 7 dias (Figura 9 (a)), e a segunda com 91 dias (Figura 9 (b)). Pode-se visualizar pequenas quantidades de hidratos em torno das partículas de cinza na idade de 7 dias, observa-se também a formação de portlandita (CH). Na idade mais avançada, as partículas de cinza reagiram completamente, também é possível verificar maior formação de C-S-H e uma microestrutura mais fechada da pasta (HANEHARA et al., 2001).

Figura 9- Micrografia de pasta produzida com cinza volante: 7 dias de cura (a), 91 dias de cura (b)



Fonte: Hanehara et al. (2001)

Além das pozolanas, os materiais inertes também alteram a hidratação do cimento, mas essa alteração ocorre por meio do efeito fíler. Quando o cimento é substituído parcialmente por um mineral inerte ocorrem três efeitos físicos que modificam a hidratação, são eles: o efeito da diluição, o efeito da alteração na distribuição do tamanho das partículas, e o efeito da nucleação heterogênea. O efeito da diluição corresponde ao aumento na relação água/cimento da mistura, ou seja, quanto maior a quantidade de material inerte substituindo o cimento, menor a quantidade de cimento hidratado. O efeito da distribuição granulométrica das partículas está relacionado com uma alteração na porosidade inicial da matriz por meio do melhor empacotamento das

partículas. Por fim, a nucleação é um processo físico que leva a ativação química da hidratação do cimento. Quando a superfície do material inerte é compatível com o produto de hidratação ocorre a precipitação preferencial desse produto na superfície do mineral inerte. Isso ocorre, pois, a energia interfacial entre dois sólidos é menor que a energia interfacial entre o sólido e a solução. Dessa forma, o grau de saturação da solução necessário para que ocorra a precipitação dos produtos de hidratação é menor na presença dessas partículas inertes, aumentando assim os pontos de nucleação disponíveis para o crescimento dos hidratos (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003).

Nesse trabalho foi utilizado como adição mineral o resíduo proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar. O principal componente da cinza residual do bagaço da cana é o  $\text{SiO}_2$ . Devido esse fato, muitas pesquisas exploram o uso desse material como pozolana em matrizes cimentícias (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009a; CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009; CORDEIRO et al., 2009; FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; JIMÉNEZ-QUERO et al., 2013; MONTAKARNTIWONG et al., 2013; RUKZON; CHINDAPRASIRT, 2012a; SINGH; SINGH; RAI, 2000). O processamento do bagaço, teor de carbono, a composição mineralógica, e distribuição granulométrica das partículas são as principais características que influenciam na reatividade das cinzas. Na Tabela 5 estão apresentadas as características de diversas cinzas analisadas em diferentes estudos. Por meio desse levantamento, pode-se concluir que as cinzas produzidas à temperatura e processos de moagem controlados apresentam reatividade pozolânica significativa (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009a; CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009; CORDEIRO et al., 2009; FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; JIMÉNEZ-QUERO et al., 2013; MONTAKARNTIWONG et al., 2013). De modo geral, as cinzas provenientes dos filtros são mais reativas do que as cinzas das caldeiras. As cinzas das caldeiras são compostas predominantemente por sílica cristalina, especialmente quartzo proveniente do solo da lavoura (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011), e essas partículas afetam negativamente a reatividade do material (DE SOARES et al., 2016). Por essa razão, pesquisadores recomendam o uso da cinza das caldeiras como material inerte (fíler/agregado) (SALES; LIMA, 2010; SUA-IAM; MAKUL, 2013b) para serem incorporadas em concretos (ARIF; CLARK; LAKE, 2017; MORETTI et al., 2016) e argamassas (ALMEIDA et al., 2015).

Tabela 5- Características de diversas cinzas do bagaço da cana utilizadas em diferentes estudos.

Ref.	Origem	Processamento	Dimensão da partícula ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> (%)	PF* (%)	Atividade pozolânica	Uso recomendado
(SUA-IAM; MAKUL, 2013b)	Área de despejo	-	D <sub>50</sub> = 107,9	65,3	15,3	-	Agregado
(SALES; LIMA, 2010)	Caldeiras + filtro	moagem	D <sub>max</sub> = 600,0	62,7	16,3	-	Agregado
	Caldeiras	moagem	D <sub>max</sub> = 1200,0	93,5	0,3		
(CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009)	Bagaço queimado em laboratório	Calcinação (~400°C)	D <sub>50</sub> = 12,2	-	84,5	Insuficiente - 28% (NBR 5752)	-
		Calcinação (~500°C)	D <sub>50</sub> = 11,3	-	14,0	Insuficiente - 73% (NBR 5752)	-
		Calcinação (~600°C)	D <sub>50</sub> = 11,6	61,0	5,7	Adequada - 77% (NBR 5752)	Pozolana
		Calcinação (~700°C)	D <sub>50</sub> = 12,3	-	3,0	Insuficiente - 63% (NBR 5752)	-
		Calcinação (~800°C)	D <sub>50</sub> = 10,1	-	1,3	Insuficiente - 69% (NBR 5752)	-
(FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011)	Bagaço queimado em laboratório	Calcinação (~800°C)	D <sub>50</sub> = 12,0	69,4	1,6	Alta - fixou 94% de cal aos 90 dias	Pozolana
	Filtros	Temperatura (~300°C)	D <sub>50</sub> = 12,0	56,0	18,0	Baixa / média - fixou 42% de cal aos 90 dias	Pozolana
	Caldeiras	Temperatura (~800°C)	D <sub>50</sub> = 18,0	66,6	4,3	Muito baixa - fixou 11% de cal aos 90 dias	Material inerte
(JIMÉNEZ-QUERO et al., 2013)	Área de despejo	Calcinação (~700°C)	D <sub>50</sub> = 20,0	56,4	10,5	-	Pozolana
(CORDEIRO et al., 2009)	Caldeiras	-	D <sub>80</sub> =199,0	78,3	0,4	49,5	-
		Moagem 960 min em moinho rotativo	D <sub>80</sub> =27,2			84,1	-
		Moagem 240 min em moinho vibratório	D <sub>80</sub> =5,4			103,0	Pozolana
(CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009a)	--	Moagem	D <sub>50</sub> =10,0	64,9	8,2	113%	Pozolana
(BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015)	Filtros	-	D <sub>10</sub> =300,0	72,9	21,0	72%	-
		Calcinação (700°C)			14,0	86%	Pozolana

Tabela 5 - Características de diversas cinzas do bagaço da cana utilizadas em diferentes estudos.

Ref.	Origem	Processamento	Dimensão da partícula ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> (%)	PF* (%)	Atividade pozolânica	Uso recomendado
(RUKZON; CHINDAPRASIRT, 2012a)	--	Moagem	D <sub>50</sub> =16,4	65,0	10,5	-	Pozolana
(SINGH; SINGH; RAI, 2000)	Caldeiras	-	-	63,2	6,9	Havia menos cal livre nas pastas com cinzas do que na pasta de referência (método Franke modificado)	Pozolana
(MONTAKARNTIWONG et al., 2013)	Sistema de purificação úmido	Calcinação (~1000°C); Moagem	D <sub>95</sub> =45,0	76,8	20,4	102%	Pozzolan
	Sistema de purificação multi ciclone			67,1	3,3	101%	Pozolana
(DE SOARES et al., 2016)	Caldeira	-	D <sub>50</sub> =12,2	72,3	1,5	Baixa	Material inerte
(ARIF; CLARK; LAKE, 2017)	Caldeira	-	D <sub>50</sub> = 40,0	73,5	-	Insuficiente–72% (AS 35836)	Filer
(MORETTI et al., 2016)	Caldeira	Moagem	D <sub>max</sub> = 1180,0	80,2	0,8	-	Agregado
(ALMEIDA et al., 2015)	Caldeira	Moagem	D <sub>max</sub> = 1200,0	80,8	0,7	Baixa - fixou 48 mg de CaO / g de cinza (Chapelle modificado)	Agregado

\*PF = Perda ao fogo

#### 2.4.1 Influência da incorporação de adições minerais em matrizes cimentícias.

O principal benefício da incorporação de adições minerais nas matrizes cimentícias refere-se ao refinamento na estrutura porosa da matriz, com isso, o material se torna mais resistente ao ataque dos agentes agressivos.

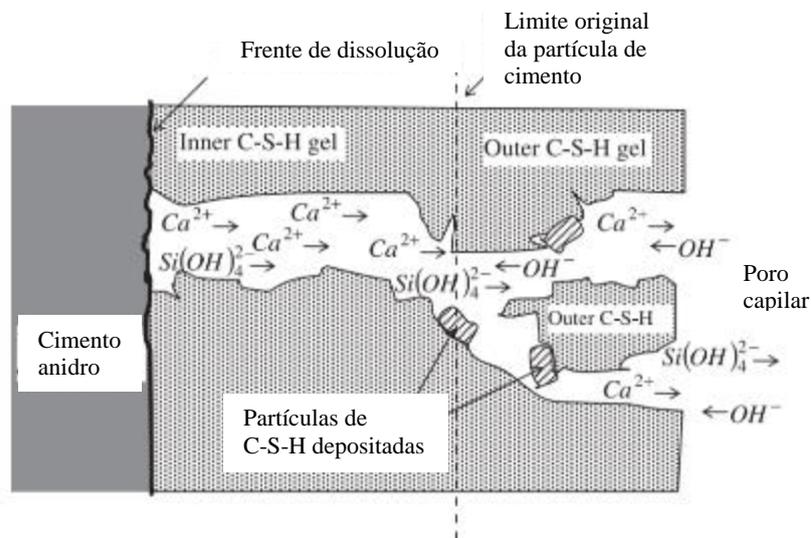
No trabalho desenvolvido por Uysal et al. (2012), concretos produzidos com cinza volante e escória de alto forno apresentaram maior resistência à penetração de cloretos e melhor trabalhabilidade que o concreto de referência (sem adição).

Bijen (1996) afirma que a maior influência da incorporação da cinza volante e da escória nas matrizes cimentícias diz respeito à redução da difusividade dos íons e maior resistência ao ataque químico. A redução na difusividade de íons é um efeito positivo na proteção das armaduras ao ataque dos íons cloretos. Quanto ao ataque químico, a melhor

resistência nas matrizes produzidas com a cinza volante e escória ocorre devido a menor disponibilidade de cal livre e maior formação do C-S-H.

Narmluk & Nawa (2011) explicam que a maior resistência à difusão iônica de matrizes produzidas com pozolanas ocorre tanto pela maior espessura das camadas C-S-H formadas pela reação pozolânica quanto pela deposição das partículas C-S-H nos poros de gel (Figura 10). No início da hidratação, o C-S-H formado está “solto” e também é poroso, existem poros gel grandes e pequenos, sendo assim, a difusão iônica ocorre nos poros grandes e pequenos. Em seguida, o C-S-H que estava “solto” se acomoda pela deposição de outras partículas de C-S-H nos grandes poros gel, estreitando e/ou colmatando os caminhos, dificultando a difusão dos íons no interior da matriz a medida que a hidratação avança.

Figura 10- Ilustração da deposição do C-S-H nos poros da matriz cimentícia.



Fonte: Narmluk & Nawa (2011)

Diversos trabalhos evidenciam bons resultados da incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes cimentícias. Katare & Madurwar (2017) realizaram um estudo recente de revisão da literatura sobre a influência da incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como pozolana em matrizes cimentícias. De modo geral, as matrizes produzidas com a cinza apresentaram ganhos de resistência e durabilidade. Segue abaixo os resultados mais relevantes do estudo:

- O coeficiente de absorção capilar foi reduzido com substituição do cimento pela cinza para teores de até 15%;

- Concretos produzidos com teores de até 15% de cinza em substituição ao cimento apresentaram resistência à compressão e à tração superiores ao concreto sem cinza;
- A penetração de cloretos é menor para concretos produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em comparação ao concreto de referência;
- É possível substituir até 25% do cimento pela cinza na produção de concretos sem comprometer as propriedades físicas, químicas e de durabilidade.

No trabalho desenvolvido por Amin (2011), concretos produzidos com 20% de cinza em substituição ao cimento apresentaram uma redução de 50% na difusão de cloretos. Os resultados do estudo de Rukzon & Chindaprasirt (2012) também apontam que a substituição do cimento pela cinza (até 30%) aumenta a resistência à penetração dos cloretos, além disso, os concretos produzidos com os diferentes teores de cinza apresentaram resistência à compressão iguais ou superiores à referência.

Os trabalhos em que as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar com grande teor de quartzo foram utilizadas em substituição ao agregado miúdo na produção de concretos e argamassas também apresentaram resultados satisfatórios. No estudo de Sales & Lima (2010), as argamassas produzidas com 20% e 30% de cinza em substituição da areia apresentam ganhos de resistência à compressão. Argamassas produzidas com teor de 30% de cinza em substituição da areia apresentaram resistência à compressão similares à argamassa de referência (sem cinza), menor porosidade e maior resistência à penetração de cloretos (ALMEIDA et al., 2015). Arif et al. (2017) utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial da areia na produção de concretos. Os pesquisadores observaram um ganho de resistência mecânica e menor retração para os concretos produzidos com a cinza, por outro lado, houve um aumento no ingresso de cloretos. Os autores acreditam que esse resultado foi mascarado pelo uso de aditivo superplastificante necessário para manter a trabalhabilidade dos concretos produzidos com a cinza.

Por meio da revisão da literatura fica evidente que a incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como pozolana/agregado modifica a estrutura porosa da matriz cimentícia e, conseqüentemente, pode dificultar o transporte de agentes agressivos no seu interior. Visto isso, ressalta-se a importância de analisar as diferenças da porosidade e também da suscetibilidade das matrizes produzidas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar frente ao ingresso dos agentes agressivos.

## 2.5 Ensaios utilizados para analisar a porosidade e o transporte dos agentes agressivos em matrizes cimentícias

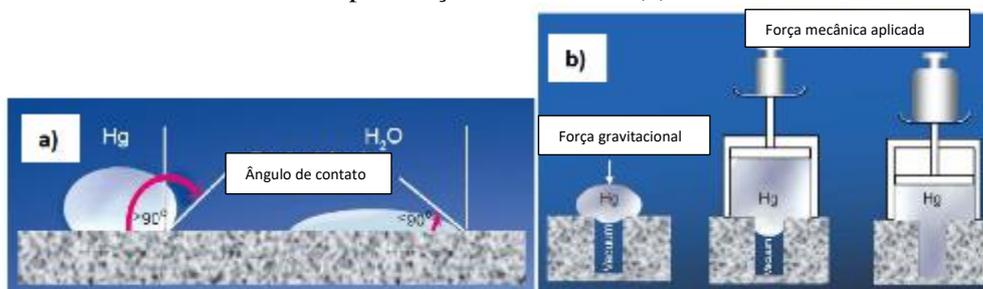
Nesse item será apresentada uma breve revisão da literatura englobando os principais ensaios utilizados nesse trabalho para avaliar as diferenças entre as matrizes cimentícias produzidas com e sem ACBC.

### 2.5.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio é capaz de fornecer a distribuição e tamanho dos poros. Essa técnica é muito utilizada para caracterizar a estrutura porosa de materiais cimentícios (GALLÉ, 2001; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; LI et al., 2017). Além da distribuição dos poros, também são determinados o volume total de poros, a dimensão média de poros e a porosidade total.

O mercúrio é um líquido que não molha a maioria dos materiais devido seu elevado ângulo de contato. Como pode ser verificado na Figura 11 (a), o ângulo de contato do mercúrio é maior que  $90^\circ$ , e da água é menor que  $90^\circ$ , desta forma, ao contrário da água, é necessário aplicar uma pressão para que o mercúrio preencha os poros de um material (Figura 11 b).

Figura 11 – Ângulo de contato do mercúrio e da água (a), pressão aplicada para a penetração do mercúrio (b).



Fonte: Micromeritics (2017).

O volume de mercúrio intrudido é registrado a cada valor de pressão aplicada, a informação sobre a distribuição dos poros é obtida da curva resultante do volume cumulativo de mercúrio pelo aumento da pressão. Para que ocorra a intrusão do mercúrio, é necessário que a força externa supere a tensão superficial do mercúrio e o ângulo de contato entre o mercúrio e o material. A relação entre o tamanho do poro e a pressão necessária para que o mercúrio seja introduzido é calculada pela equação Washburn:

$$D = \frac{-4\gamma\cos\theta}{P}$$

Equação 12

Onde:

$\gamma$ = tensão superficial do mercúrio

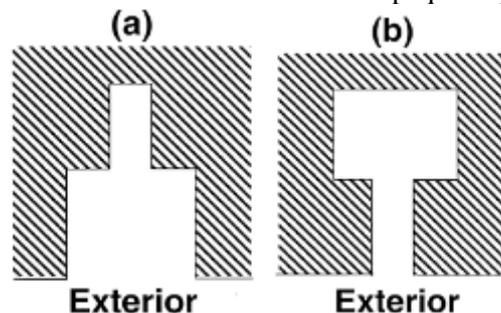
$\theta$ = ângulo de contato entre o mercúrio e a parede dos poros

P= pressão exercida

A equação resulta em uma relação entre pressão e diâmetro do poro. Assim, quanto menor o poro, maior a pressão necessária para que ocorra a penetração do mercúrio.

Apesar de muito utilizada, essa técnica apresenta algumas limitações, a primeira refere-se à forma do poro, que é considerada como cilíndrica, mas na verdade os poros podem ser alongados ou possuírem diferentes formas. Outra limitação deste ensaio refere-se à identificação de poros conectados (Figura 12). No caso do poro representado pela Figura 12 (b), a equação irá indicar apenas o diâmetro do menor poro, o diâmetro do maior poro não será detectado. Isso ocorre, pois, a pressão necessária para o mercúrio acessar o menor poro é muito maior que a pressão necessária para o mercúrio acessar o maior poro, ou seja, ao aplicar uma pressão P1 para o mercúrio acessar o menor poro, o maior poro também será preenchido (Figura 12 (b)). No caso do poro representado pela Figura 12 (a), será necessária uma pressão P1 menor para o mercúrio acessar o poro maior e uma pressão maior P2 para o mercúrio acessar o menor poro. Desta forma, este método não proporciona uma real distribuição de tamanhos de poros.

Figura 12- Poro pequeno conectado com o exterior através de um grande poro (a), poro grande conectado com o exterior através de um pequeno poro (b).

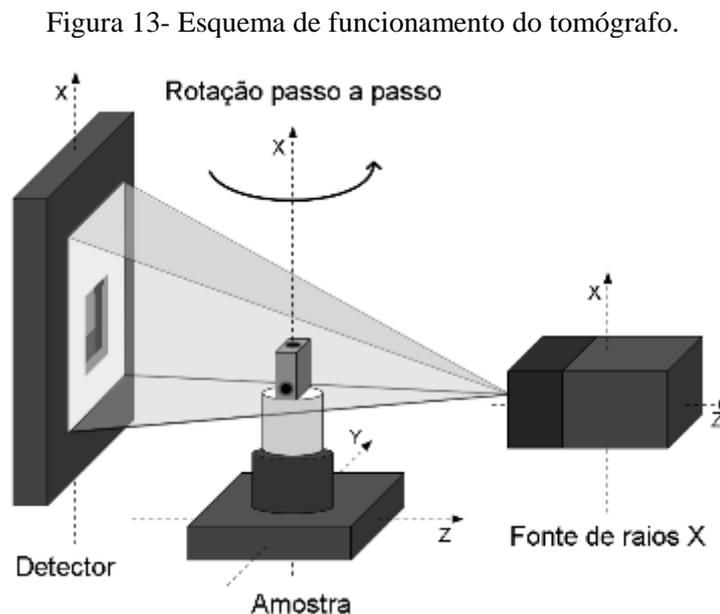


Fonte: Diamond (2000).

### 2.5.2 Tomografia computadorizada de raios-X.

A tomografia computadorizada de raios-X é uma técnica não destrutiva capaz de descrever o interior de um objeto através de imagens em 3D. Essa técnica foi criada na década de 70 pelo engenheiro inglês Hounsfield e o físico/matemático norte-americano Cormack com o foco de realizar diagnósticos em seres humanos (CARVALHO, 2002).

Em uma Tomografia Computadorizada por Absorção de Raios X (TCRX) a amostra é rotacionada sob a radiação emitida por uma fonte de raios-X (Figura 13). A distribuição de intensidade da radiação após atravessar o objeto é determinada por meio de um detector plano e digitalmente armazenada como uma projeção 2D. As projeções resultantes da rotação completa da amostra são a entrada do algoritmo matemático usado para construir um volume virtual que representa a amostra interna e externamente.



Fonte: Silva & Baldo (2014).

Além da aplicação na área médica, essa técnica também vem sendo utilizada para estudar os materiais. A tomografia foi aplicada por diversos pesquisadores para analisar a porosidade de argamassas durante o processo de lixiviação (BURLION; BERNARD; CHEN, 2006); para avaliar a evolução do dano causado em argamassa durante carregamento de compressão (ELAQRA et al., 2007); para avaliar a fissuração de concreto fraturado sob compressão uniaxial (AGAR-OZBEK et al., 2013); para monitorar vazios em argamassas com diferentes idades (BIRGUL, 2008); para estudar a porosidade de argamassas produzidas com escória de alto forno (MANSO et al., 2011); para investigar a permeabilidade de concretos (CHUNG et al., 2014); para avaliar a

distribuição porosa de pastas produzidas com diferentes teores de incorporação de ar (CHUNG et al., 2016); e para avaliar a porosidade de argamassas produzidas com adições de baixa densidade (LANZÓN et al., 2012).

### 2.5.3 Resistividade elétrica.

A resistividade elétrica é a propriedade que indica a resistência do material ao fluxo de corrente elétrica. O ensaio de resistividade elétrica é uma técnica simples, rápida e não destrutiva que fornece informações importantes sobre o desenvolvimento microestrutural de matrizes cimentícias. Os resultados obtidos são indicativos de diversas propriedades relacionadas à durabilidade do material, tais como: difusividade, permeabilidade, e conectividade dos poros (TUMIDAJSKI, 2005). Os resultados são fortemente afetados pelas características do material, como por exemplo o grau de saturação. Para um mesmo concreto, a resistividade pode variar de 10  $\Omega$ .m na condição saturado para  $10^6$   $\Omega$ .m na condição seca (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013). Além do grau de saturação, outro fator que influencia na resistividade elétrica é a composição da água existente nos poros do material, pois a disponibilidade de íons nessa solução depende da composição química da matriz cimentícia, e também do tempo de hidratação (XIAO; LI, 2008).

A técnica de resistividade elétrica é muito utilizada para indicar o risco de corrosão em estruturas de concreto, quanto maior a resistividade, menor a propensão à corrosão, pois maior é a dificuldade do fluxo de íons no interior do concreto. A análise em estruturas pode ser realizada com a presença de eletrodos embutidos ou apenas encostados à superfície do concreto (RIBEIRO et al., 2014). Na Tabela 6 estão apresentados os valores indicativos de resistividade e o grau de risco de corrosão associado (OLLIVIER & VICHOT, 2014).

Tabela 6- Valores de resistividade e riscos associados.

<b>Resistividade do concreto (K<math>\Omega</math>.cm)</b>	<b>Risco de corrosão</b>
> 100	Desprezível
50 a 100	Baixo
10 a 50	Moderado
< 10	Forte

Fonte: Ollivier e Vichot, 2014

Diversos fatores interferem na resistividade do concreto, como: relação água/cimento, tipo e quantidade de agregado, consumo de cimento, presença de adições

ou aditivos, grau de hidratação do cimento, porosidade da matriz, temperatura, umidade relativa, presença de agentes agressivos, entre outros (RIBEIRO et al., 2014).

A medida de resistividade elétrica do concreto pode ser realizada pelo método de Wenner (método dos 4 eletrodos), normalizado pela ASTM G57 (ASTM, 1992). O método consiste na aplicação de uma corrente elétrica entre os dois eletrodos externos, e a diferença de potencial é captada pelos eletrodos internos. A resistividade elétrica é calculada pela Equação 13.

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot V}{I}$$

Equação 13

Onde:

$\rho$ : resistividade ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

L: distância entre os eletrodos (cm);

V: voltagem medida entre os eletrodos centrais (V);

I: corrente (A)

Alguns fatores devem ser levados em consideração para a correta obtenção dos dados de resistividade, como (SILVA, 2006):

- Presença da armadura: como o aço é um bom condutor de corrente elétrica, a presença dele no concreto pode mascarar os resultados da resistividade, ou seja, o material irá apresentar menor resistividade;
- A geometria do corpo de prova deve garantir a formação de um campo elétrico dentro da geometria da amostra;
- A distância entre os eletrodos deve ser menor que  $\frac{1}{4}$  da menor dimensão da peça de concreto (Gowers e Millard (1999) *apud* Silva 2006);
- Deve-se garantir bom contato entre o equipamento e o concreto;
- Temperatura controlada, uma vez que o aumento da temperatura faz com que a resistividade diminua.

Vale salientar que essa técnica deve ser associada a outras técnicas no monitoramento da corrosão, pois a mesma apenas indica a qualidade do concreto, e não está relacionada à presença, ou velocidade de corrosão das armaduras.

#### 2.5.4 Absorção de água por capilaridade.

O ensaio de capilaridade em matrizes cimentícias consiste em verificar a absorção de água por um determinado tempo quando uma face da amostra é colocada em contato com a água. A NBR 9779:2012 (ABNT, 2012) normaliza esse procedimento para concretos e argamassas, onde o ganho de massa proveniente da absorção capilar é verificado após 3h, 6h, 9h, 24h, 48h, e 72h do contato da amostra com a água. Algumas normas internacionais sugerem um método mais rápido de ensaio, como por exemplo a norma francesa RILEM TC 166-PCD (RILEM, 1999) onde o ganho de massa da amostra devido a absorção de água é verificado após 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 e 240 minutos. Para analisar a qualidade do material frente à capilaridade, é possível obter o coeficiente de sortividade (ou coeficiente de absorção capilar). A sortividade caracteriza a tendência de um material poroso de absorver e transmitir água por capilaridade (HALL; MARCHESE; D'AMORE, 1989) e essa propriedade é obtida pela aplicação da Equação 14. O coeficiente de sortividade corresponde ao coeficiente angular da reta que é obtida ao plotar a raiz do tempo *versus* a absorção capilar.

$$i = St^{0,5}$$

Equação 14

Onde:

$i$  = absorção capilar por unidade de área (g/cm<sup>2</sup>)

$S$  = sortividade (g/cm<sup>2</sup>.min<sup>-0,5</sup>)

$t$  = tempo

Quanto menor o coeficiente de sortividade, menor a capacidade do material de absorver e transmitir água por capilaridade, ou seja, menor a suscetibilidade do material ao ingresso dos agentes que causam degradação.

#### 2.5.5 Penetrabilidade de cloretos.

A suscetibilidade ao ingresso de cloretos em matrizes cimentícias pode ser avaliada por métodos acelerados por meio da aplicação de uma diferença de potencial. O ensaio preconizado pela ASTM C1202 (ASTM, 1991) é largamente utilizado para avaliar a resistência do concreto à penetração de cloretos. Nesse ensaio uma amostra de concreto é posicionada entre duas células, uma contendo cloreto de sódio e a outra contendo hidróxido de sódio. A aplicação de uma diferença de potencial de 60 V faz com que os

íons se desloquem no interior do concreto. Os valores da corrente elétrica são monitorados a cada 30 minutos durante 6 horas, e, por meio desses dados obtém-se a carga total passante no sistema (mais detalhes sobre esse ensaio estão descritos na metodologia). Vale salientar que o mecanismo de transporte preponderante nesse ensaio é a migração, e que por meio do resultado obtido é possível avaliar qualitativamente o material. Na Tabela 7 estão apresentadas as classes de risco de penetração de cloretos de acordo com a carga total passante obtida no ensaio descrito pela ASTM C1202 (ASTM, 1991).

Tabela 7- Classificação quanto ao risco de penetração de cloretos de concretos.

Carga total passante (Coulombs)	Risco de penetração de cloretos
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 – 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

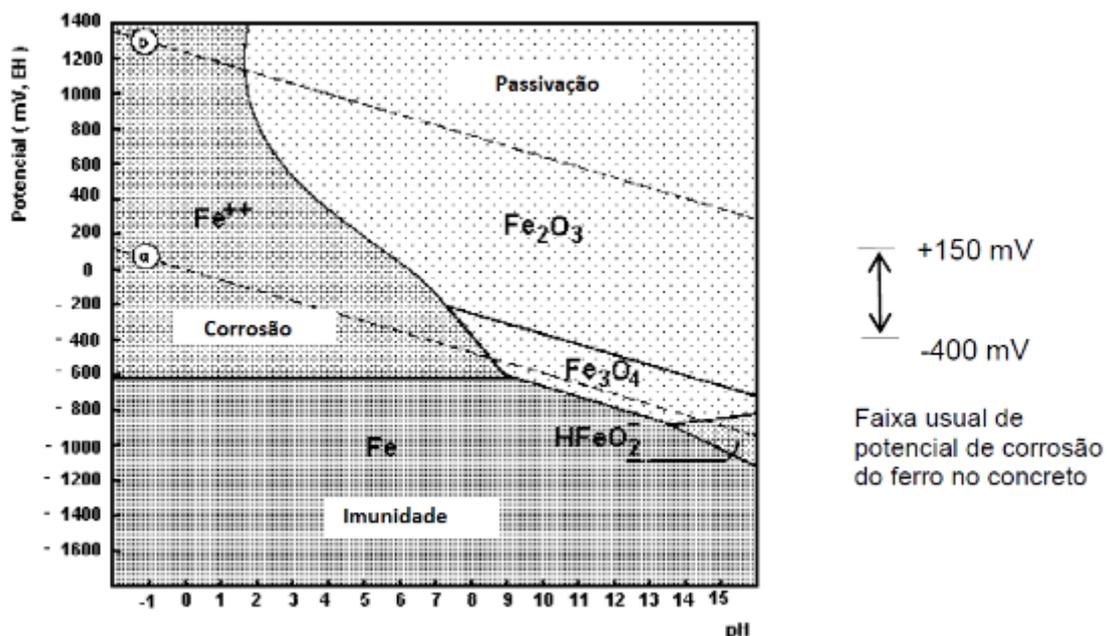
Fonte: ASTM (1991).

Apesar de muito utilizado, esse ensaio vem sendo criticado por diversos pesquisadores (SHI, 2004). Quando o concreto é colocado na célula, antes da aplicação da corrente elétrica, ocorre um processo de difusão dos íons devido as diferenças de concentração existentes. Após a aplicação da diferença de potencial, ocorre a migração não só dos íons cloreto, mas sim de todos os íons disponíveis no interior do material ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ), essa movimentação de íons dá origem a corrente elétrica que é monitorada (ANDRADE, 1993). Os resultados não correspondem somente a penetrabilidade dos íons cloreto, pois estão associados também a movimentação dos íons existentes na solução de água de poros do concreto. Sendo assim, as diferenças de composição de concretos podem “mascarar” os resultados obtidos, pois a incorporação de novos materiais pode, por exemplo, aumentar a condutividade elétrica da solução de água de poros e não necessariamente aumentar a penetrabilidade de cloretos.

## 2.6 Passivação do aço em concreto

A solução existente nos poros do concreto apresenta elevada alcalinidade (pH em torno de 12,5). Nas idades iniciais, essa alcalinidade é devida à solução saturada de hidróxido de cálcio (portlandita) oriunda das reações de hidratação do cimento. Nas idades mais avançadas, a alcalinidade é mantida pelas soluções de hidróxido de sódio e hidróxido de potássio proveniente dos álcalis do cimento (CASCUDO, 1997). A solução alcalina promove a formação de um filme aderente de óxidos na superfície do aço. Esse filme passivo protege a armadura, dessa forma, a corrosão só irá ocorrer quando essa película for danificada (MEHTA & MONTEIRO, 2006). A perda dessa proteção pode ocorrer devido a carbonatação (que causa a redução do pH), e também pela ação dos íons cloreto, provocando assim a despassivação da armadura (RIBEIRO et. al. 2014). O diagrama de Pourbaix (Figura 14) indica as condições de potencial e pH delimitando os domínios de passivação, corrosão e imunidade da armadura.

Figura 14- Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico.

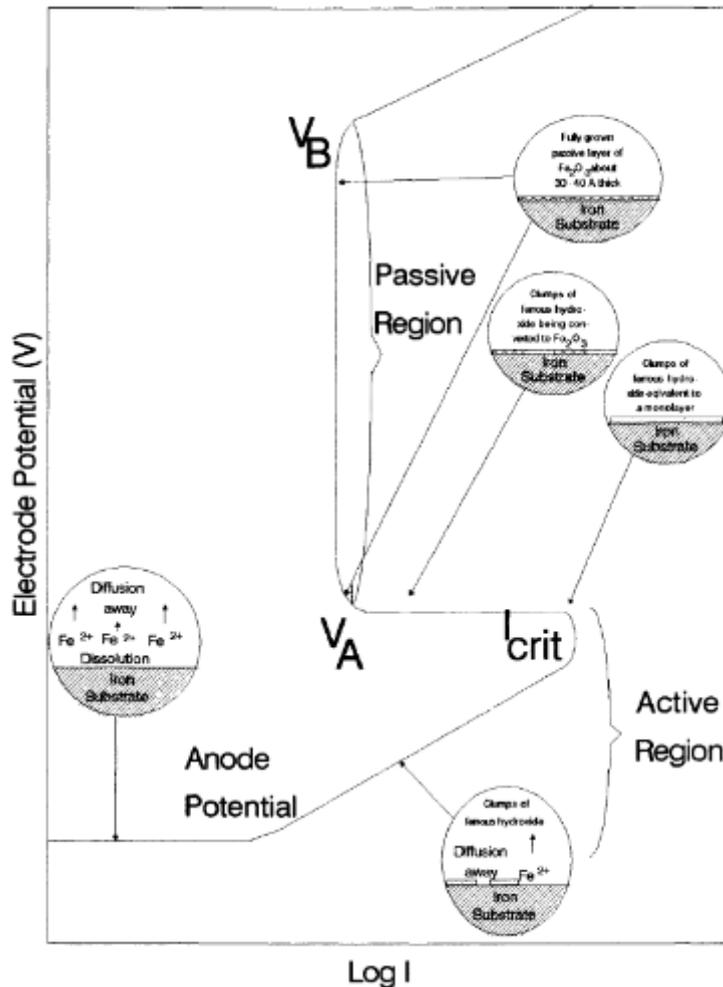


Fonte: Cascudo (1997).

A transição ativa-passiva do metal pode ser visualizada no diagrama de Evans (Figura 15) para a polarização do aço em concreto. No início do diagrama ocorre a dissolução do ferro e a corrente do sistema aumenta. Em seguida, aglomerados de hidróxido de ferro precipitam no aço e o potencial começa a aumentar, sendo assim, essa região é delimitada como ativa. Em seguida, os aglomerados de hidróxido de ferro

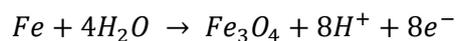
recobrem o substrato, nessa etapa a corrente começa a reduzir, e então, o hidróxido de ferro é convertido em  $Fe_2O_3$  e o filme começa a crescer. Nessa etapa a corrente do sistema é muito pequena ( $< 0,1 \mu A/cm^2$ ) e o potencial aumenta (partindo de  $V_A$ ) até o crescimento total do filme (até atingir  $V_B$ ), essa região é delimitada como passiva (LEEK, 1991).

Figura 15- Diagrama de Evans para a polarização do aço em concreto.

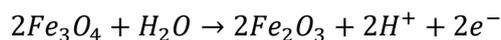


Fonte: Leek (1991).

De acordo com Leek (1991), a formação do filme de passivação em solução alcalina ocorre de acordo com as reações apresentadas nas equações 15 e 16, cujos produtos formados são os óxidos de ferro II e III que aderem ao aço.



Equação 15



Equação 16

Diferente de Leek (1991), Oranowska & Smialowska (1981) verificaram que a película passivadora formada no aço exposto à solução saturada de cal é composta por oxi-hidróxidos de ferro e cálcio. Além disso, Yonezawa et al. (1988, *apud* MORENO et al., 2004) detectou a formação de um filme descontínuo de  $Ca(OH)_2$  no aço passivado em solução saturada de cal.

Apesar das divergências na composição, é um consenso entre os pesquisadores que o filme passivador é fino, inicialmente possui uma espessura de 1 – 40 nm podendo atingir de 1 – 2  $\mu m$ . Além disso, a literatura aponta que a estabilização do filme ocorre em uma gama ampla de potencial, variando de +600 a -400 mV (em relação ao eletrodo de hidrogênio) (LEEK, 1991). Vale salientar que a película passivadora não bloqueia a corrosão do aço, ela apenas reduz a taxa de corrosão a níveis insignificantes onde a dissolução do metal é desprezível (ACI, 2010).

Outra questão relevante refere-se ao tempo necessário para a formação do filme de passivação. Poursaee & Hansson (2007) estudaram a passivação de aço embutido em argamassa e também na solução sintética de água de poros. O tempo requerido para a passivação do aço na argamassa foi de 7 dias e na solução de 3 dias. Essa diferença ocorre devido a maior mobilidade dos íons na solução sintética quando comparada com a mobilidade iônica na argamassa. Diferente de Poursaee & Hansson, Ghods et al., (2009) sugerem que são necessários 8 dias para a estabilização dos óxidos do filme passivador de aço em solução sintética de água de poros. Além disso, a composição química da solução de água de poros também possui grande influência na formação do filme passivador. Ghods et al. (2009) realizaram um estudo para verificar a passivação do aço em soluções sintéticas de água de poros contendo diferentes concentrações de  $Ca^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  e  $(SO_4)^{2-}$ . Os pesquisadores verificaram que o aumento da concentração de  $(SO_4)^{2-}$  influencia negativamente nas propriedades de proteção do filme passivador.

Por meio da revisão da literatura, pode-se concluir que diversos fatores influenciam na formação e características dos filmes passivadores. Dentro desse contexto, nesse trabalho foram utilizadas as técnicas de monitoramento do potencial de circuito aberto (PCA) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar se a incorporação da ACBC altera a passivação do aço exposto à solução de água de poros.

O potencial de circuito aberto é uma técnica não destrutiva e de fácil aplicação, porém é uma técnica qualitativa. A mesma consiste em medir a diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho (armadura) e um eletrodo de referência, sendo que a diferença de potencial ocorre entre a semicélula aço/solução (eletrólito) e a semicélula estável (eletrodo de referência). Quando um metal é colocado em uma solução contendo íons, ocorre uma alteração dos potenciais do metal e da solução até atingir um equilíbrio, o qual corresponde a formação de uma dupla camada elétrica. Além da formação da dupla camada elétrica, também pode ocorrer reações químicas que levam a alteração da superfície do metal, como por exemplo a passivação e a corrosão. Esses processos provocam a formação de pilhas na superfície da armadura, ou seja, existem regiões anódicas e catódicas. Devido a isso, existe uma diferença de potencial entre as regiões catódicas do aço e o eletrólito e também entre as regiões anódicas do aço com o eletrólito. Sendo assim, a diferença de potencial refere-se a um potencial misto. O valor obtido da diferença de potencial traz um indicativo do balanço entre as reações anódicas e catódicas, o qual é um parâmetro termodinâmico que fornece informações qualitativas de passivação ou corrosão (CASCUDO, 1997). Diante disso, com o monitoramento do PCA é possível acompanhar o crescimento do filme durante a estabilização do potencial. Esse experimento oferece uma informação termodinâmica sobre o sistema e serve como um indicativo do estado da armadura (corrosão ou passivação).

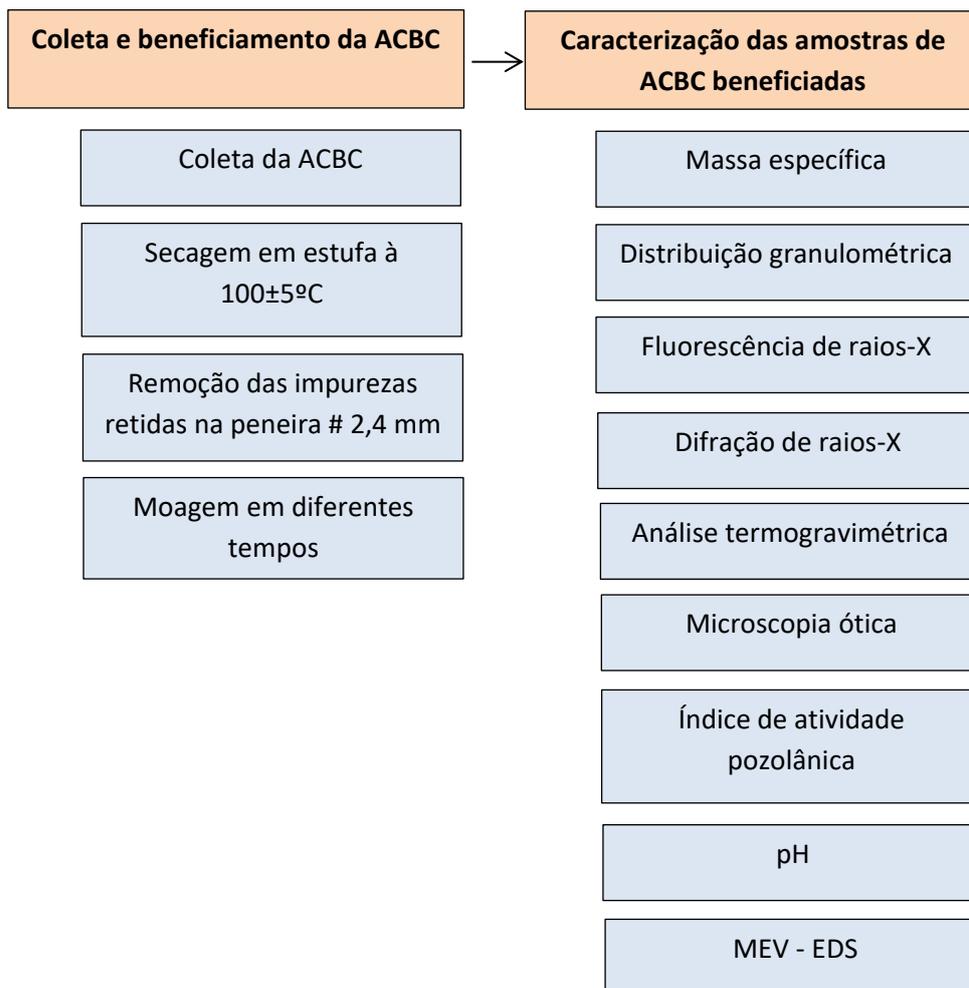
### **3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo são apresentados os principais materiais e procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho. Vale salientar que esse estudo foi desenvolvido em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT, no âmbito do Programa Novos Talentos.

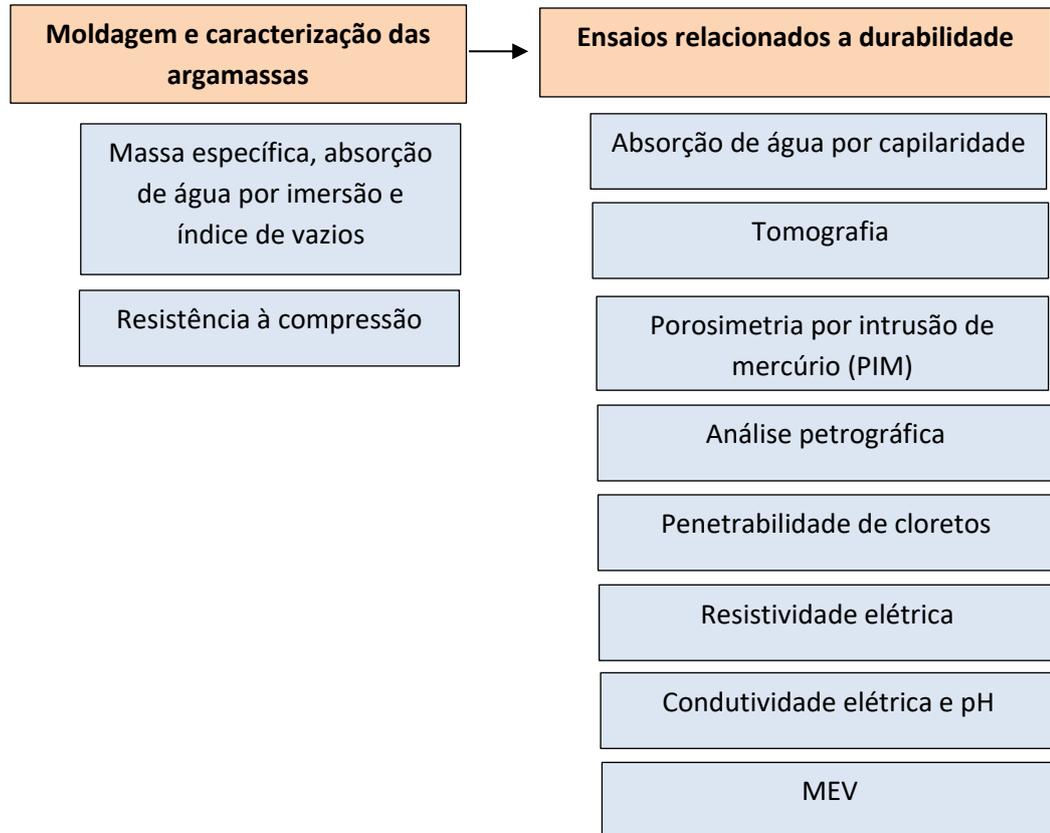
Por meio da revisão da literatura fica evidente que a incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como pozolana ou agregado modifica a microestrutura da matriz cimentícia, e, conseqüentemente, pode interferir no transporte de agentes agressivos no seu interior. Além disso, essa incorporação também pode afetar as características da solução de água de poros, interferindo assim na passivação das armaduras.

O presente trabalho experimental foi dividido em três etapas principais. Na primeira etapa foi realizado um estudo exploratório com a finalidade de verificar a melhor maneira de aplicar a cinza coletada. Para tanto foram realizados processos de moagem e ensaios para verificar a atividade pozolânica do material. Na segunda etapa, após a investigação das características das cinzas produzidas, foi realizado um estudo na fase argamassa. Nesse estudo buscou-se verificar as alterações provocadas pela incorporação da ACBC principalmente no quesito de porosidade e no transporte dos agentes agressivos no interior da matriz. Na terceira etapa, foi realizado um estudo em solução de água de poros com o foco de avaliar a influência da ACBC na passivação do aço. Pode-se visualizar a seguir o organograma das principais etapas do projeto.

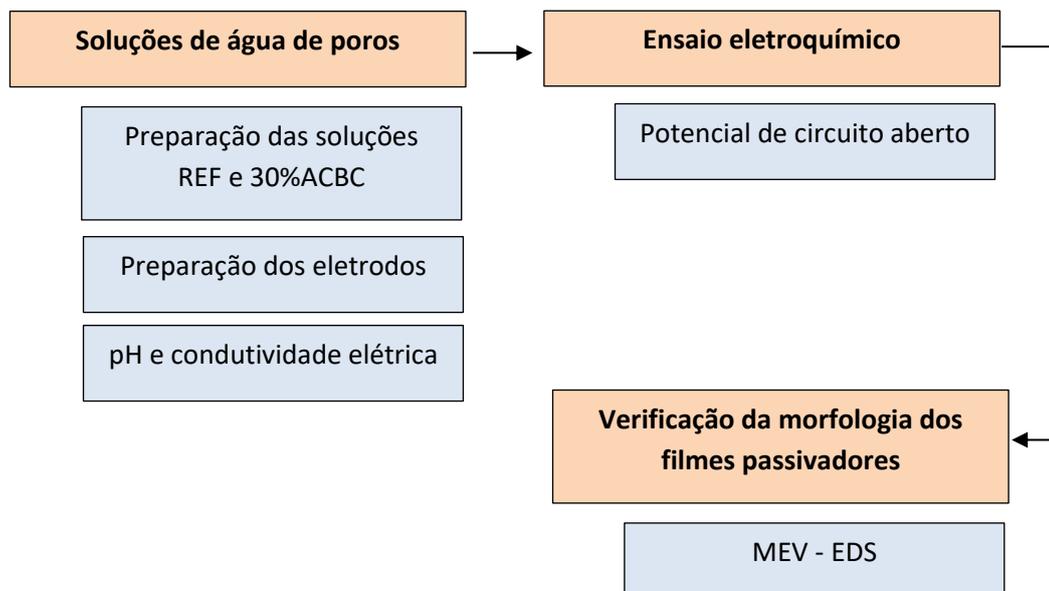
## 1ª Etapa: ACBC



## 2ª Etapa: Argamassa



## 3ª Etapa: Solução de água de poros



### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram: cimento Portland CP V ARI Plus, areia média, areia fina, aço CA 60, e areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC).

#### 3.1.1 Cimento Portland

Nesta pesquisa foi utilizado o cimento CPV ARI fabricado pela Holcim do Brasil S/A. A caracterização física e química do cimento foi realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 8. O cimento está em conformidade com as exigências da NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 8- Características físicas e químicas – CP V ARI PLUS.

Características físicas		Características químicas			
	Unit.	Valor	Componentes	% (em massa)	
Massa específica (ABNT, 2001a)	g/cm <sup>3</sup>	3,12	Perda ao fogo	3,79	
Início de pega (ABNT, 2003a)	min	135	SiO <sub>2</sub>	19,17	
Fim de pega (ABNT, 2003a)	min	210	CaO	63,97	
Água para pasta de consistência normal	%	31,5	MgO	0,61	
Finura	Retido # 200	%	0,1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,21
	Sup. Esp. Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4730	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,03
Resistência à compressão (f <sub>cj</sub> )	1 dias	MPa	27,5	SO <sub>3</sub>	2,84
	3 dias		42,0	Na <sub>2</sub> O	0,06
	7 dias		48,7	K <sub>2</sub> O	0,61
	28 dias		52,2	CO <sub>2</sub>	2,38
			CaO livre	1,76	
			Resíduo insolúvel	0,85	
			Equivalente alcalino	0,46	

#### 3.1.2 Areias

Foram utilizadas areia fina e areia média, ambas comercializadas na cidade de São Carlos. As características físicas das areias estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9- Características físicas das areias naturais.

<b>Características</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Areia Fina</b>	<b>Areia Média</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)e NM 53 (ABNT, 2009b)	2,64	2,60
Massa unitária seca e solta (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,50	1,62
Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,70	1,68
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2001b) e NM 53 (ABNT, 2009b)	0,34	0,46
Material pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003b)	1,33	0,35
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010a)	-	0,35
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001c)	Solução mais clara que a padrão	Solução mais clara que a padrão

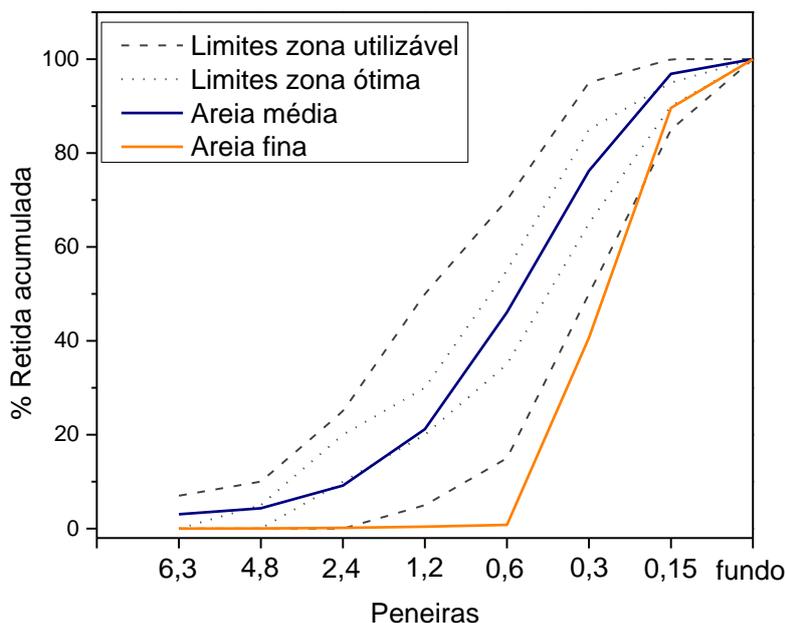
Para a realização do ensaio de distribuição granulométrica dos agregados foi utilizada a série de peneiras especificada pela ASTM E 323 (ASTM, 2009). Foram utilizadas três amostras de 1 kg de agregado e o peneiramento foi realizado em um agitador mecânico, sendo que o resultado foi apresentado pela média das três determinações. Na Tabela 10 estão apresentados os resultados do ensaio de distribuição granulométrica da areia fina e areia média.

Tabela 10- Distribuição granulométrica das areias.

Peneira (mm)	Areia Fina		Areia média	
	% Retida	% Acumulada	% Retida	% Acumulada
<b>8,00</b>	-	-	2,01	2,01
<b>6,300</b>	0,00	0,00	1,04	3,05
<b>5,600</b>	0,00	0,00	0,41	3,47
<b>4,800</b>	0,02	0,02	0,87	4,34
<b>4,000</b>	0,02	0,04	0,85	5,19
<b>3,400</b>	0,02	0,07	0,49	5,68
<b>2,800</b>	0,04	0,10	1,67	7,35
<b>2,400</b>	0,05	0,16	1,82	9,17
<b>2,000</b>	0,06	0,22	2,24	11,41
<b>1,700</b>	0,06	0,28	2,78	14,18
<b>1,400</b>	0,05	0,33	2,78	16,96
<b>1,200</b>	0,09	0,42	4,21	21,17
<b>1,000</b>	0,12	0,54	6,05	27,22
<b>0,850</b>	0,07	0,60	4,72	31,94
<b>0,710</b>	0,07	0,68	7,61	39,55
<b>0,600</b>	0,11	0,79	6,55	46,10
<b>0,500</b>	6,10	6,89	8,62	54,72
<b>0,425</b>	12,16	19,06	8,17	62,89
<b>0,355</b>	6,69	25,75	5,66	68,55
<b>0,300</b>	14,91	40,66	7,67	76,22
<b>0,250</b>	12,59	53,25	7,51	83,72
<b>0,212</b>	7,17	60,42	3,91	87,64
<b>0,180</b>	17,73	78,15	5,76	93,40
<b>0,150</b>	11,45	89,61	3,47	96,87
<b>0,125</b>	2,23	91,84	1,06	97,92
<b>0,106</b>	4,30	96,14	0,94	98,87
<b>Fundo</b>	3,86	100,00	1,13	100,00

A areia fina apresentou dimensão máxima característica de 0,6 mm, módulo de finura de 1,32 e curva de distribuição granulométrica fora dos limites da zona utilizável (Figura 16) determinada pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009c). A areia média apresentou dimensão máxima característica de 4,8 mm, módulo de finura de 2,54 e curva de distribuição granulométrica dentro dos limites da zona ótima (Figura 16).

Figura 16- Curva granulométrica das areias.



### 3.1.3 Aço CA 60.

Foi utilizado aço CA 60 com diâmetro de 5 mm, fabricado pela Gerdau. A caracterização química do aço foi realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e os resultados podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11- Composição química do aço CA-60.

Elementos	% em massa
Fe	98,69
C	0,15
Si	0,21
Mn	0,66
P	0,02
Cr	0,09
Ni	0,04
Mo	0,01
Cu	0,12
S	0,015

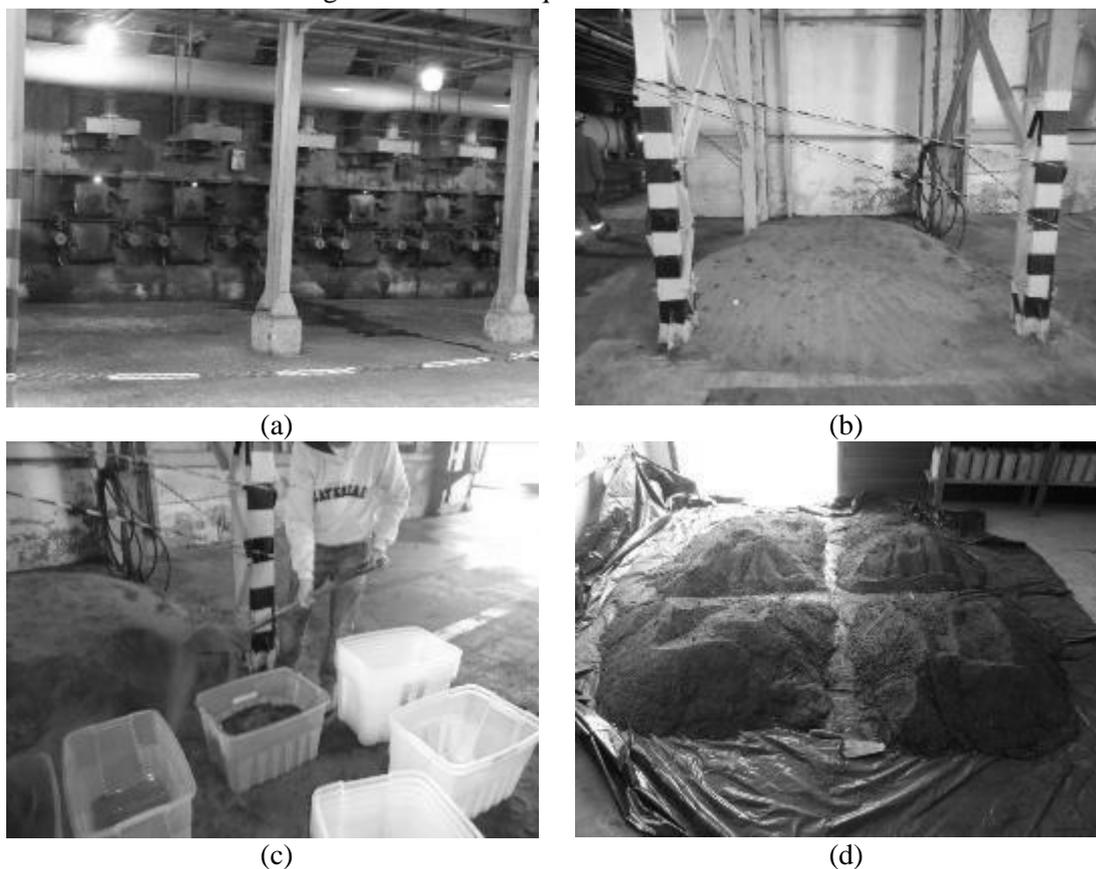
### 3.2 1ª Etapa: Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC).

O material utilizado nessa pesquisa foi coletado das caldeiras de uma Usina sucroalcooleira localizada no município de Jaú-SP. A denominação areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) foi dada por Almeida (2013) devido à grande quantidade de areia proveniente da lavoura incorporada ao material.

### 3.2.1 Coleta e beneficiamento da ACBC

As amostras de ACBC foram retiradas das caldeiras (Figura 17 (a)) pelos funcionários da usina e resfriadas em local coberto (Figura 17 (b)). O material foi coletado e armazenado em caixas plásticas (Figura 17 (c)). No laboratório, as amostras de ACBC foram quarteadas (Figura 17 (d)) e beneficiadas.

Figura 17- Coleta e quarteamento da ACBC.



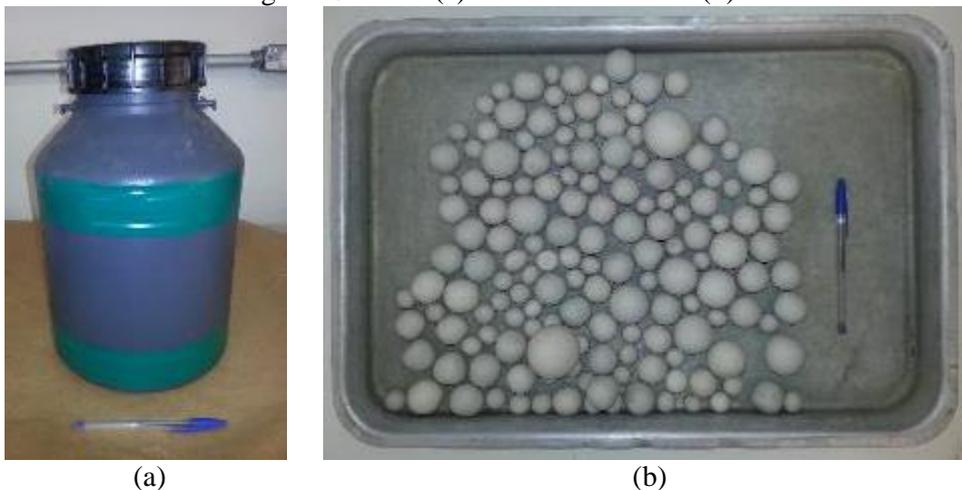
O beneficiamento da ACBC foi realizado por meio das seguintes etapas: secagem em estufa a temperatura de  $100 \pm 5$  °C por 24 horas; peneiramento do material em peneira de malha 2,4mm, para a retirada de impurezas e moagem em moinho de bolas no departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar (Figura 18).

Figura 18- Moinho de bolas.



Para realizar a moagem da ACBC, foi utilizado um vasilhame de polietileno com volume de 10 litros (Figura 19 (a)), 5 litros de corpos moedores (10,5kg) e 2,5 litros de ACBC (3kg). Foram utilizadas bolas de alumina (Figura 19 (b)) com os seguintes diâmetros: 20 mm (154 unidades), 30 mm (46 unidades), 40 mm (18 unidades) e 50 mm (4 unidades).

Figura 19- Jarro (a) e bolas de alumina (b).



Para definir os parâmetros de moagem da ACBC foi necessário determinar a velocidade crítica. A velocidade crítica é definida como a velocidade na qual os corpos moedores permanecem na carcaça do moinho devido a força centrífuga (Beraldo, 1987 *apud* Cordeiro, 2006). Essa velocidade é definida pela seguinte equação:

$$V_{ac} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad V_{ac} = \frac{42,3}{\sqrt{0,23}} = 88rpm$$

Equação 17

Onde:

$V_{ac}$  = *velocidade crítica (rpm)*

$D$  = *diâmetro do moinho (m)*

A velocidade de rotação adotada foi de 35 rpm, que corresponde a 40% da velocidade crítica (CORDEIRO, 2006). As condições de moagem adotadas visaram promover uma moagem tipo cascata, com a finalidade de obter materiais mais finos. A moagem da ACBC foi realizada em intervalos de tempo distintos de 0, 30, 60, 90, 120 e 240 minutos e as amostras foram denominadas como ACBC N, ACBC 30, ACBC 60, ACBC 90, ACBC 120 e ACBC 240, respectivamente.

Além da moagem em moinhos de bolas, uma amostra de ACBC foi moída pela empresa NETZSCH, com o intuito de obter partículas com dimensões inferiores a 50  $\mu\text{m}$ . A moagem foi realizada em moinho de esferas vertical de eixo excêntrico com bolas de óxido de zircônio. Foram utilizados 2 litros de bolas de 5 mm de diâmetro e 2 quilos de ACBC, o período de moagem foi de 30 minutos e a velocidade do eixo do moinho de 40 Hz, essa amostra de ACBC foi denominada como ACBC Micro.

### **3.2.2 Caracterização da ACBC.**

A caracterização das amostras de areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi realizada por meio dos seguintes ensaios: fluorescência de raios-X (FRX), massa específica, granulometria a laser, difração de raios-X (DRX), análise termogravimétrica (TG), microscopia óptica (MO), índice de atividade pozolânica (IAP), potencial hidrogeniônico (pH), e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de dispersão de energia (EDS).

#### **3.2.2.1 Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)**

A composição química das amostras de ACBC foi determinada pela técnica de fluorescência de raios-X. Foi utilizado o espectrômetro de fluorescência de raios-X da marca Panalytical modelo Minipal Cement (Na-U). Por meio da FRX é possível identificar e estabelecer a proporção dos elementos existentes na amostra. Essa técnica baseia-se em excitar os átomos da amostra através da aplicação de uma fonte de radiação de elevada energia, a qual possibilita a entrada de fótons de raios-X que atingem os elétrons. Os elétrons atingidos são retirados da camada atômica de menor energia, e essa camada é preenchida por elétrons de maior energia. Durante esse processo ocorre

liberação de energia (fluorescência) desprendida na forma de fótons de raios X. A radiação emitida pela amostra caracteriza os elementos existentes, os raios originados são isolados e identificados pelo comprimento de onda ou pela energia.

### 3.2.2.2 Massa específica

A massa específica das amostras de ACBC foi determinada por picnometria de hélio, e para tanto, utilizou-se o equipamento Micromeritics Accupyc 1340 (Figura 20).

Figura 20- Equipamento utilizado no ensaio de picnometria de hélio.



A massa específica é uma relação entre a massa e volume de sólidos das partículas (excluindo-se os poros permeáveis). O ensaio de picnometria de hélio consiste em medir a mudança de pressão ocorrida em uma célula sem a presença de partículas de sólido e uma célula com a presença de partículas de sólido. O volume de sólidos é calculado pela equação abaixo:

$$V_s = V_c - \left( \frac{P_1}{P_2} - 1 \right)$$

Equação 18

Onde:

- $V_s$  é o volume de sólidos (em  $\text{cm}^3$ );
- $V_c$  é o volume da célula (em  $\text{cm}^3$ );
- $P_1$  é o valor da pressão (em psi) determinado com a célula;
- $P_2$  é o valor da pressão (em psi) determinada com a célula contendo partículas do sólido.

O ensaio de massa específica foi realizado em triplicata para cada amostra seca de ACBC.

### 3.2.2.3 Granulometria a laser

A distribuição granulométrica das amostras de ACBC foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser. Foi utilizado o equipamento Mastersizer 2000, versão 5.12, da marca Malvern Instruments (Figura 21). Neste ensaio, um feixe de laser é disparado sobre a amostra dispersa, e o tamanho das partículas é determinado pela variação angular dos raios. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos e as partículas pequenas, em grandes ângulos. As amostras de ACBC foram dispersas em álcool elítico.

Figura 21 – Analisador de partículas Mastersizer 2000.



### 3.2.2.4 Difração de raios-X (DRX)

A técnica de DRX é muito utilizada para caracterizar a estrutura cristalina dos materiais. Um sólido cristalino é constituído por um arranjo de átomos ordenados com regularidade periódica numa rede tridimensional (rede cristalina). Quando um feixe de raios-X monocromáticos é incidido sobre os átomos, os elétrons absorvem essa radiação, vibram e emitem ondas com a mesma frequência e em diversas direções. A superposição dessas ondas resulta na difração, podendo ocorrer interferências construtivas e destrutivas. Quando a diferença na distância percorrida por duas ondas idênticas difratadas resultar em um número inteiro de comprimento de onda, ocorre a interferência construtiva e as condições de difração dos raios-X foram definidas pela lei de Bragg:

$$2d \cdot \sin\theta = n\lambda$$

Equação 19

Onde:

$d$  = distância entre os sucessivos planos do cristal (distância interplanar);

$\theta$  = ângulo de difração entre o plano atômico e o feixe incidente e refletido;

$n$  = número inteiro de comprimento de onda;

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação incidente.

Por meio da aplicação da lei de Bragg, são obtidas informações das distâncias interplanares dos planos cristalográficos e a intensidade da reflexão, possibilitando assim, caracterizar os cristais.

Para a identificação das fases cristalinas das amostras de ACBC foi utilizado o equipamento Rigaku modelo Windmax 2000, operando na radiação  $K\alpha$  do cobre com 40kV – 20mA, varredura  $3^\circ$  a  $70^\circ$  e tempo de corrida  $1^\circ/\text{min}$ . A identificação dos compostos foi executada por meio do software X-pert HighScore Plus (versão 2.2) da Panalytical e padrões difratométricos fornecidos pelo ICCD (International Center for Diffraction Data) com atualização até 2003. Utilizou-se a base de dados de minerais e cimento.

A determinação do teor de material amorfo e cristalino da ACBC 240 (amostra utilizada nas argamassas) foi realizada no Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais (LEDMA) da Universidade Federal da Bahia. Foi utilizado um difratômetro D2 Phaser Bruker, que contém um tubo de alvo de cobre de 10 mA e 30 kva. Os ensaios foram realizados com a faixa de varredura de  $5^\circ$  a  $80^\circ$  ( $2\theta$ ), incremento de  $0,5^\circ/\text{segundo}$ , e os teores de material cristalino e amorfo foram quantificados pelo software DIFFRAC.EVA V3.2.

### **3.2.2.5 Análise termogravimétrica.**

Na análise termogravimétrica, a variação de massa de uma amostra é monitorada durante um período de aquecimento a uma taxa controlada. A variação de massa ocorre devido às reações químicas ou alterações físicas do material. Os resultados de variação de massa e temperatura são expressos por uma curva, denominada TG. Ao derivar a curva TG em relação à temperatura, obtém-se a curva DTG, onde é possível identificar as temperaturas limites das reações e também indicar a ocorrência de reações sobrepostas. Além disso, essa técnica permite extrair informações sobre a estabilidade térmica dos materiais.

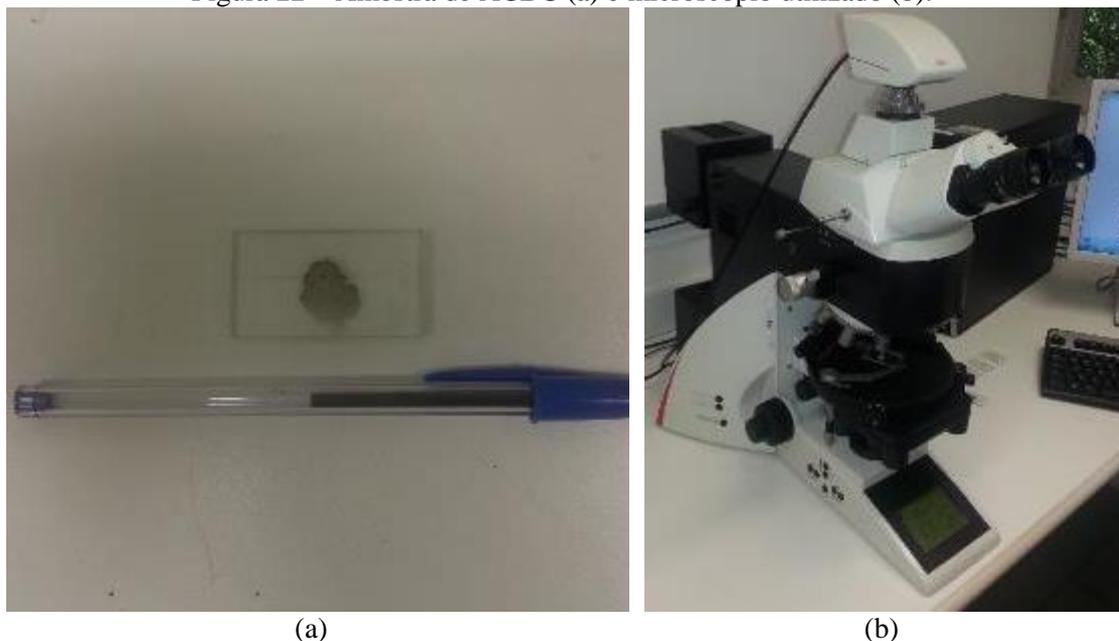
A análise termogravimétrica da ACBC foi realizada com base nas diretrizes gerais da ASTM E 794 - Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis (ASTM, 2001). A amostra de ACBC foi moída até

atingir dimensões de partículas passantes na peneira ABNT #325 (0,045 mm). O ensaio foi realizado no equipamento TA Instrument, modelo SDT 2960 Simultaneous. Utilizou-se cadinho de alumina sem tampa; com fluxo de gás de 50mL/min de nitrogênio (N<sub>2</sub>) e taxa de aquecimento de 10°C/min até aproximadamente 1000°C.

### 3.2.2.6 Microscopia ótica

O microscópio óptico é um instrumento composto por um sistema de lentes associadas em conjunto com uma fonte de luz visível utilizado para ampliar e observar estruturas pequenas invisíveis a olho nu. Nesse estudo, a microscopia ótica foi utilizada para observar as diferenças de dimensões de partículas das amostras de ACBC moídas em diferentes tempos. As amostras de ACBC foram colocadas em lâminas de vidro (Figura 22 (a)) e observadas no microscópio Leica DM 4500P com auxílio do software LAS v.4.2 (Figura 22 (b)).

Figura 22 – Amostra de ACBC (a) e microscópio utilizado (b).



### 3.2.2.7 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

O índice de atividade pozolânica (IAP) das amostras de ACBC foi determinado pelos seguintes ensaios: Chapelle Modificado, índice de atividade pozolânica com o cimento Portland e índice de atividade pozolânica com a cal. Todos os ensaios de IAP foram realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Vale salientar que o intuito desses ensaios foi verificar a influência da granulometria na atividade pozolânica da ACBC.

### 3.2.2.7.1 Chapelle modificado

O ensaio de Chapelle foi realizado de acordo com a NBR 15895:2010 (ABNT, 2010b). Foram utilizadas as seguintes amostras: ACBC N, ACBC 30, ACBC 60, ACBC 90, ACBC 120, ACBC 240 e ACBC MICRO. Neste ensaio, a pozolanicidade é determinada pela capacidade do material em fixar o cálcio quando mantido em suspensão aquosa com óxido de cálcio durante 16h à 90°C, sob agitação constante. A pozolanicidade do material está intimamente vinculada a natureza e pureza do material, à sua composição mineralógica e diretamente proporcional à área específica (QUARCIONI et al., 2015). Para comparar os resultados obtidos nas amostras de ACBC, foi determinado um índice de desempenho em comparação ao desempenho mínimo necessário do metacaulim (700 mg Ca(OH)<sub>2</sub> / g de metacaulim), conforme a seguinte equação:

$$I_{chappelle} = \frac{C_{Ca(OH)_2ACBC}}{700} \cdot 100$$

Equação 20

Onde:

$I_{chappelle}$  = Índice de desempenho (%)

$C_{Ca(OH)_2ACBC}$  = consumo de cal obtido no ensaio de Chapelle (mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g de ACBC)

### 3.2.2.7.2 Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland.

O ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) com o cimento Portland foi realizado de acordo com a NBR 5752:2014 (ABNT, 2014b). Utilizou-se o cimento Portland CP II F 32, areia normalizada, água deionizada, e as amostras ACBC N, ACBC 120, ACBC 240 e ACBC Micro. Foram produzidas argamassas com ACBC e uma argamassa de referência (sem ACBC). A argamassa de referência foi confeccionada com uma proporção cimento-areia de 1:3 (em massa) e relação a/c = 0,48. Nas demais argamassas 25% da massa do cimento foi substituída pela ACBC. Para manter o índice de consistência das argamassas produzidas com ACBC em ± 10 mm do índice da argamassa de referência foi utilizado aditivo superplastificante ADVA 525. Na Tabela 12, pode-se verificar o índice de consistência e teores de aditivo utilizado nas diferentes argamassas.

Tabela 12- Teor de SP e consistência das argamassas produzidas.

Amostras	Teor de SP	Consistência (mm)			
		d1	d2	d3	dm
<b>Controle</b>	-	182	180	179	180
<b>ACBC N</b>	0,20%	184	183	184	184
<b>ACBC 120</b>	0,05%	183	189	190	187
<b>ACBC 240</b>	-	174	174	172	173
<b>ACBC Micro</b>	-	204	212	206	207

Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para cada traço. Os corpos de prova permaneceram em cura imersa até a idade de ruptura (28 dias). O índice de desempenho foi calculado pela seguinte equação:

$$I_{cimento} = \frac{f_{cACBC}}{f_{cREF}} \cdot 100$$

Equação 21

Onde:

$f_{cACBC}$  = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com ACBC (MPa)

$f_{cREF}$  = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova de referência (MPa)

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014a), o índice de desempenho mínimo com o cimento deve ser de 90%.

### 3.2.2.7.3 Índice de atividade pozolânica com a cal.

O IAP com a cal foi determinado de acordo com as especificações da NBR 5751:2015 (ABNT, 2015). Foram utilizados os seguintes materiais: hidróxido de cálcio, areia normalizada, água deionizada, e as amostras ACBC N, ACBC 120, ACBC 240 e ACBC Micro. As argamassas foram produzidas com a proporção de cal - areia normalizada de 1:9 (em massa); quantidade de ACBC correspondente ao dobro do volume da cal e quantidade de água necessária para manter o índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm (Tabela 13). Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm por traço. Durante as primeiras 24 horas, os corpos de prova foram mantidos à temperatura de  $23 \pm 2$  °C. Nas 144 horas posteriores, os mesmos foram mantidos em estufa à temperatura de  $55 \pm 2$  °C. A ruptura por compressão foi realizada após 7 dias da moldagem.

Tabela 13- Quantidade de água e consistência das argamassas produzidas.

Amostras	Quantidade de água (g)	Consistência (mm)			
		d1	d2	d3	dm
ACBC N	240	228	228	228	228
ACBC 120	200	226	237	226	230
ACBC 240	192	224	229	223	225
ACBC Micro	180	219	226	221	222

Segundo a NBR 12653:2014 (ABNT, 2014a), a argamassa deve apresentar resistência à compressão mínima de 6 MPa.

### 3.2.2.8 Potencial Hidrogeniônico (pH)

A determinação do pH é importante para verificar a corrosibilidade do resíduo. Segundo a NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), um resíduo é considerado corrosivo quando o pH da solução for inferior a 2 e superior a 12,5. Para esse ensaio foi preparada uma solução com relação 1:1 (resíduo : água deionizada) em massa. Utilizou-se um pHmetro digital microprocessado modelo PG1800 do fabricante GEHAKA (Figura 23). Os ensaios foram realizados em triplicata.

Figura 23 – pHmetro utilizado.



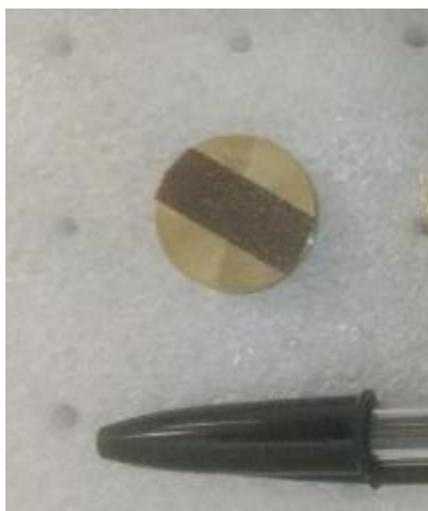
### 3.2.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica muito utilizada para caracterizar a microestrutura de materiais, pois permite aumentos da ordem de 30.000 vezes. Nessa técnica, um feixe de elétrons é incidido sobre a amostra promovendo interações físicas, as quais podem resultar no espalhamento elástico ou não elástico dos

elétrons. No espalhamento elástico, a trajetória dos elétrons dentro da amostra é afetada, mas não ocorre alteração na energia cinética, e esses elétrons são denominados como retroespalhados. No espalhamento não elástico, ocorre a perda da energia cinética dos elétrons para os átomos da amostra, gerando assim elétrons secundários, elétrons Auger, raios-X e catodoluminescência. Por meio dos elétrons secundários é possível obter imagens da topografia da amostra em alta resolução. Por outro lado, os elétrons retroespalhados fornecem imagens de menor resolução, no entanto, é possível identificar as diferenças na composição química das fases pelo maior ou menor brilho nas imagens. Além da captação de imagens, os aparelhos de MEV equipados com detectores de energia dispersiva realizam a análise química das regiões de interesse nas amostras.

A amostra de ACBC foi colada em um porta amostra com uma fita de carbono e coberta com uma fina camada de ouro. O aspecto da amostra preparada pode ser visualizado na Figura 24 (a). As análises foram executadas em microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (FEG), marca FEI, modelo Quanta 400 (Figura 24 b). As imagens foram obtidas utilizando detector de elétrons secundários (SE), em condições de tensão de aceleração de 20 kV e distância de trabalho (WD) de aproximadamente 10 mm. O espectroscópio de raios X (EDX) utilizado é da marca EDAX.

Figura 24 – Amostra de ACBC preparada para ensaio de MEV(a), MEV utilizado (b).



(a)



(b)

### 3.3 2ª Etapa: Argamassas

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos adotados para a realização dos ensaios na argamassa.

#### 3.3.1 Moldagem e cura

A moldagem das argamassas foi realizada no laboratório de materiais e componentes (LMC) da UFSCar. O traço de referência adotado foi 1 : 1,35 : 1,65 : 0,55 (cimento : areia fina : areia média : a/c). Vale salientar que a proporção dos materiais foi determinada pelo teor de argamassa de concretos obtidos em estudos prévios. A areia fina foi substituída parcialmente pela ACBC nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% (em volume) e a relação água/cimento foi mantida constante para todas as misturas. A composição dos traços (em massa) e o índice de consistência das argamassas, obtidos de acordo com as especificações da NBR 13276:2005 (ABNT, 2005a), estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Composições das argamassas estudadas.

Composições	Proporção dos materiais (em massa)					Índice de consistência (mm)
	Cimento	ACBC	Areia Fina	Areia Média	a/c	
0% ACBC	1,000	-	1,350	1,650	0,550	256
10% ACBC	1,000	0,138	1,216	1,650	0,550	253
20% ACBC	1,000	0,275	1,081	1,650	0,550	246
30% ACBC	1,000	0,413	0,946	1,650	0,550	242
40% ACBC	1,000	0,551	0,811	1,650	0,550	223

O consumo de materiais por m<sup>3</sup> e a relação entre ACBC/cimento podem ser verificados na Tabela 15.

Tabela 15- Consumo de materiais.

Composições	Consumo de materiais (kg/m <sup>3</sup> )					Relação ACBC/cimento
	Cimento	ACBC	Areia Fina	Areia Média	Água	
REF	496	-	670	818	273	0,00
10% ACBC	496	68	603	818	273	0,14
20% ACBC	496	136	536	818	273	0,27
30% ACBC	496	205	469	818	273	0,41
40% ACBC	496	273	402	818	273	0,55

A mistura dos materiais foi realizada em uma batedeira industrial da marca METVISA, capacidade 10 litros e com três velocidades (Figura 25). O procedimento adotado pode ser verificado abaixo:

- Misturar as areias e ACBC durante 1 minuto;
- Adicionar 90% da água durante 30 segundos;
- Deixar batendo até 2 minutos;
- Parar 30 segundos para raspar as laterais e fundo da cuba;
- Ligar e adicionar o cimento durante 30 segundos, deixar batendo 1 minuto;
- Parar 30 segundos e raspar as laterais e fundo da cuba;
- Ligar e adicionar 10% da água e bater por 1 minuto;
- Parar 30 segundos e raspar as laterais;
- Bater mais 1 minuto e 30 segundos.

Figura 25 – Batedeira utilizada.



O tempo de mistura foi de 7 minutos e todo o processo foi realizado na velocidade baixa. Após a mistura, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm (diâmetro x altura) conforme as especificações da NBR 7215:1996 (ABNT, 1996) (Figura 26 (a e b)), e corpos de prova de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), NBR 5738:2003 (ABNT, 2003c). Após a moldagem, o topo da amostra foi protegido com plástico filme para evitar a perda de água (Figura 26 (c)). Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas da moldagem e acondicionados em câmara úmida (umidade relativa de 100 % e temperatura ambiente) até as respectivas idades de ensaio (Figura 26 (d)).

Figura 26 – Moldes utilizados (a), moldagem das argamassas (b), proteção da amostra com plástico filme (c), acondicionamento em câmara úmida (d).



### 3.3.2 Ensaios realizados nas argamassas

#### 3.3.2.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Instituto de Pesquisas tecnológicas de São Paulo – IPT, segundo as especificações da NBR 7215:1996 (ABNT, 1996). Para cada composição foram utilizados 6 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Os corpos de prova foram capeados com enxofre para garantir uma distribuição uniforme do carregamento e o ensaio foi realizado nas idades de 7, 28, 91 e 365 dias.

#### 3.3.2.2 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios, e massa específica foram realizados com base nas especificações da NBR 9778:2005 (ABNT, 2005b) na idade de 28 dias. Para cada composição foram utilizados 4 corpos de prova cilíndricos medindo 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Após o tempo de cura, os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C durante 72 h para a determinação da massa seca ( $m_s$ ). Em seguida, os

mesmos foram resfriados à temperatura ambiente e imersos em água por 72 h. Após a saturação dos corpos de prova, foi determinada a massa saturada com superfície seca ( $m_{sat}$ ) e a massa saturada imersa em água ( $m_i$ ).

A absorção de água, em porcentagem, foi calculada pela Equação 22.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100$$

Equação 22

O índice de vazios é a relação entre o volume dos poros permeáveis e volume total da amostra. Esse índice foi calculado, em porcentagem, pela Equação 23.

$$I.V. = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100$$

Equação 23

A massa específica, em  $kg/cm^3$ , foi calculada pela Equação 24.

$$\rho = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i}$$

Equação 24

### 3.3.2.3 Absorção de água por capilaridade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base nas especificações da NBR 9779:2012 (ABNT, 2012) nas idades de 7, 28 e 91 dias. Para cada composição foram utilizados 4 corpos de prova cilíndricos medindo 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  ° C por 72 h e resfriados em ambiente de laboratório. Em seguida, as laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas com silicone (Figura 27 (a)) para garantir que a absorção de água ocorresse unicamente pela base do corpo de prova. Após a secagem do silicone as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca ( $m_s$ ). Em um recipiente plástico, foram posicionados suportes metálicos para apoiar as amostras, em seguida, o recipiente foi preenchido com água até a altura  $5 \pm 1$  mm acima da face inferior da amostra (Figura 27 (b)). A massa saturada ( $m_{sat}$ ) dos corpos de prova foi determinada após 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h do contato da amostra com a água.

Figura 27- Corpos de prova utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade: impermeabilização da amostra (a), amostras em contato com lâmina d'água (b).



(a)

(b)

A absorção de água por capilaridade foi calculada de acordo com a Equação 25.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S}$$

Equação 25

Onde:

$C$  = absorção de água por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

$m_{sat}$  = massa do corpo de prova no período de tempo (g).

$m_s$  = massa seca do corpo de prova (g).

$S$  = área da amostra em contato com a água ( $\text{cm}^2$ ).

Além da absorção de água por capilaridade, também foi calculada a sortividade das argamassas, conforme especificado no item 2.5.4, Equação 13.

#### 3.3.2.4 Tomografia Computadorizada por Absorção de Raios-X.

O ensaio de tomografia foi realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Utilizou-se um tomógrafo Werth Messtechnik GmbH, modelo TomoScope HV Compact (Figura 28) e a medição foi realizada em ambiente com temperatura controlada na faixa de  $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ .

Figura 28- Tomógrafo utilizado



Após 91 dias de cura, as amostras de argamassa foram secas em estufa à temperatura de  $50 \pm 5$  ° C até constância de massa. Após a secagem, o ensaio de tomografia foi realizado na amostra cilíndrica (Figura 29 (a)). Em seguida, foram extraídas duas amostras da região central da amostra cilíndrica, sendo uma cúbica (Figura 29 (b)) e outra prismática (Figura 29 (c)). A amostra cúbica foi utilizada no ensaio de tomografia e porosimetria por intrusão de mercúrio, a amostra prismática foi utilizada para o ensaio de análise petrográfica. Os parâmetros utilizados no ensaio de tomografia estão apresentados na Tabela 16.

Figura 29- Amostra cilíndrica (a), amostra cúbica (b) e amostra prismática (c).

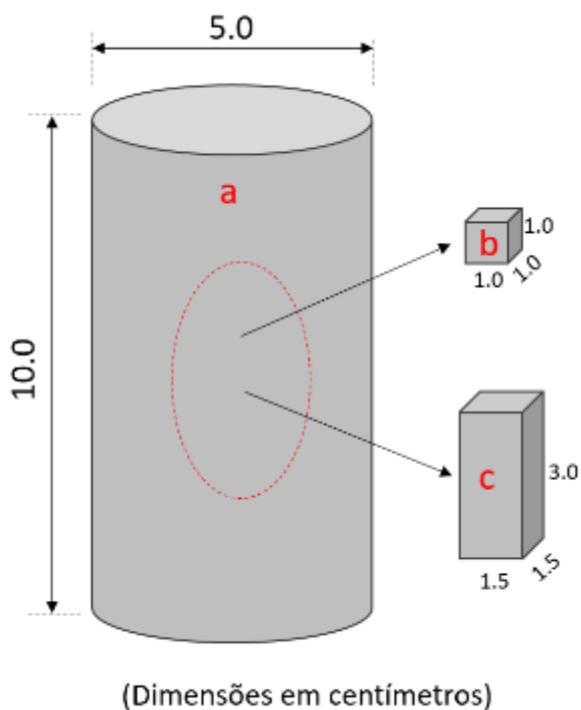


Tabela 16- Parâmetros utilizados no ensaio de tomografia.

Parâmetros	Amostras	
	a - Cilíndricas	b - Cubicas
Corrente elétrica aplicada	180 $\mu$ A	100 $\mu$ A
Faixa de resolução	30 $\mu$ m – 60 $\mu$ m	5 $\mu$ m – 10 $\mu$ m
Incremento angular	0,225°	0,225°
Tempo de integração	1 s	1/3 s
Tensão elétrica aplicada	190 kV	155 kV

Após o ensaio de tomografia, os dados gerados foram exportados para o programa VGStudio MAX 2.1 para calcular a porosidade. No programa VGStudio MAX 2.1, o volume virtual de pontos foi alinhado nos eixos x, y e z e os limites de superfície foram delimitados. A detecção foi realizada com um mínimo de 4 voxels e máximo de 1.000.000 voxels. Dessa forma, o software identificou os vazios dentro da amostra, e então foram obtidos os dados referentes a contagem dos vazios e as respectivas dimensões.

Por meio da tomografia foi possível realizar uma análise semi-quantitativa e qualitativa das argamassas produzidas com diferentes teores de ACBC. Também foi possível verificar a diferença de densidade das amostras e detectar anomalias.

#### **3.3.2.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).**

Para o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi utilizado um porosímetro da marca Micromeritics, AutoPore III, modelo 9410, com tamanho de poros de 0,006 a 360  $\mu\text{m}$ , faixa de variação de pressão de 0 a 4081 bar e resolução de intrusão  $< 0.1 \text{ ml/}$ . O ensaio foi realizado em amostras cúbicas de argamassa com  $1 \text{ cm}^3$  (Figura 29 (b)). Vale salientar que a PIM foi realizada na mesma amostra utilizada no ensaio de tomografia.

#### **3.3.2.6 Análise petrográfica.**

A análise petrográfica de matrizes cimentícias fornece informações sobre os agregados, a porosidade, fissuras, a interface pasta-agregado, etc. Alguns pesquisadores utilizaram essa técnica para investigar argamassas históricas (ELSEN, 2006; MIRIELLO et al., 2010; PAVÍA; CARO, 2008); para analisar a microestrutura de concretos produzidos com cinza pesada (MÜLLER; RÜBNER, 2006); para quantificar o teor de agregado reciclado em concreto (ABBAS et al., 2009). Nesse trabalho, a análise petrográfica foi utilizada para verificar os poros, fissuras e a homogeneidade das argamassas.

As amostras utilizadas na análise petrográfica foram extraídas da região central dos corpos de prova utilizados no ensaio de tomografia. A extração foi realizada com o auxílio de uma serra diamantada (Figura 30 (a)) e foram obtidos prismas de dimensões  $1,5 \times 3,0 \times 1,5 \text{ cm}^3$  (Figura 30 (b)).

Figura 30- Corte das amostras (a), prismas obtidos (b).



(a)



(b)

Após a extração, as amostras foram impregnadas com uma resina araldite GY 1109, ARADUR HY 951 e corante Corasol Azul BG-6136. A impregnação com resina é realizada para preencher os vazios das argamassas para posterior detecção no microscópio ótico. As amostras foram posicionadas no centro de formas metálicas, em seguida, a forma foi preenchida com resina até a metade da altura do corpo de prova (Figura 31 (a)), e então aplicou-se o vácuo. Durante a aplicação do vácuo, notou-se borbulhamento da resina (Figura 31 (b)), proveniente da extração do ar da amostra. Posteriormente, a amostra foi coberta com resina e novamente o vácuo foi aplicado até terminar o borbulhamento.

Figura 31- Impregnação das amostras de argamassa para análise petrográfica.



Após a impregnação, as amostras permaneceram em estufa a 60°C durante 24 horas para secagem e endurecimento da resina. Em seguida, foi realizado o desbaste da amostra em serra diamantada para afloramento da superfície da argamassa. O acabamento da superfície foi realizado por meio de lixamento em politriz com carbeto de silício malha 500 e álcool. Posteriormente foi realizado o lixamento em placa de vidro com carbeto de silício malha 800. Após a regularização da superfície, foi realizada a colagem da lâmina. O aspecto das amostras finalizadas pode ser visualizado na Figura 32. As lâminas foram analisadas com um microscópio Leica DM 4500P e auxílio do software LAS v.4.2.

Figura 32- Amostras utilizadas na análise petrográfica.



### 3.3.2.7 Penetrabilidade de íons cloreto

O ensaio de penetrabilidade de íons cloreto foi realizado de acordo com as especificações da ASTM C1202 (ASTM, 1991) nas idades de 28 e 91 dias. Fatias de argamassa de 10 x 5 cm (diâmetro x altura) foram obtidas através do corte de corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura). Em seguida, as laterais das amostras

foram seladas com silicone, e, após a secagem do silicone, as mesmas foram armazenadas em um dessecador onde se aplicou vácuo durante 3 horas. Após esse período, o recipiente foi preenchido com água deaerada e foi aplicado vácuo por mais 60 minutos, em seguida, a bomba foi desligada e as amostras permaneceram saturadas por  $18 \pm 2$  horas. Após a saturação, as amostras foram colocadas em duas células acrílicas, uma das células foi preenchida com solução de NaOH e a outra com solução de NaCl, as mesmas foram conectadas a uma fonte de tensão de 60V. A intensidade de corrente e temperatura das amostras foram monitoradas a cada 30 minutos durante um período total de 6 horas. Vale salientar que a temperatura do ensaio não pode ser superior a  $90^{\circ}\text{C}$ . Para cada composição foram utilizadas 2 amostras de argamassa. As principais etapas desse ensaio estão apresentadas nas fotos da Figura 33.

O resultado do ensaio é determinado pelo cálculo da carga passante, conforme a Equação 26. Quanto menor a carga passante, menos suscetível está o material ao transporte dos agentes agressivos.

$$Q = 900. (I_0 + 2 \times I_{30} + 2 \times I_{60} + \dots + 2 \times I_{330} + I_{360})$$

Equação 26

Onde:

$Q$  = carga passante em Coulombs (C).

$I_n$  = corrente medida no tempo  $n$ , em Ampères.

Nesse ensaio a movimentação dos íons no interior da amostra ocorre por difusão e migração iônica. Como o ensaio é realizado na amostra saturada, não é possível analisar os mecanismos de absorção capilar e permeabilidade (MEDEIROS; HELENE, 2009).

Figura 33- Corte dos corpos de prova (a), amostras (b), vácuo (c), saturação (d), montagem da célula (e), monitoramento (f).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

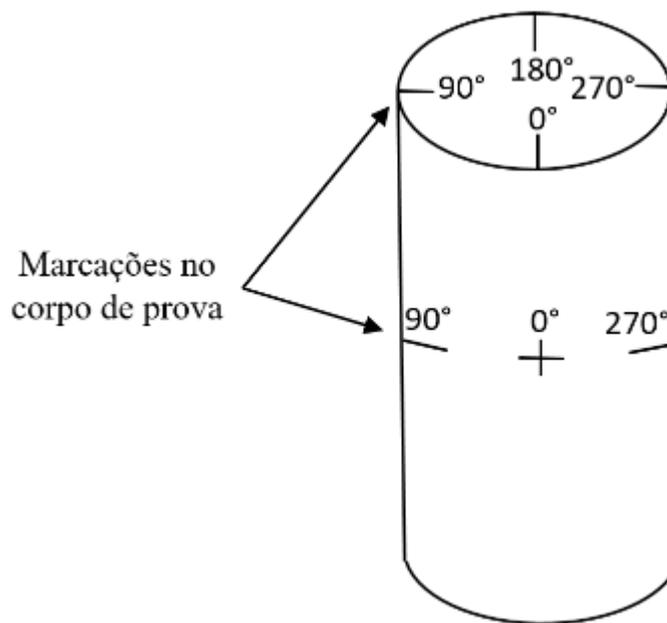


(f)

### 3.3.2.8 Resistividade elétrica

Para o ensaio de resistividade elétrica foram moldados corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing = 5 \text{ cm} \times h = 10 \text{ cm}$ ). Após a desmoldagem, foram realizadas marcações nos corpos de prova para auxiliar no posicionamento dos eletrodos no momento das medições (Figura 34).

Figura 34- Marcações realizadas nos corpos de prova de resistividade elétrica.



Os corpos de prova foram acondicionados em uma caixa plástica e imersos em água saturada com cal até as idades de medidas, que ocorreram aos 7, 28, 91 e 365 dias de cura. Foi utilizado um dispositivo desenvolvido pelos Laboratórios de Corrosão e Laboratório de Equipamentos Elétricos e Ópticos do Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, ambos do IPT, que mede a resistência elétrica volumétrica do material. O ensaio consiste em aplicar uma corrente alternada que percorre o interior do corpo de prova e obter a resistência elétrica pela Lei de Ohm ( $R = V/I$ ). Com o valor da resistência elétrica obtido, calculou-se então a resistividade elétrica pela Equação 27.

$$\rho = \frac{R \times A}{d}$$

Equação 27

Onde:

$\rho$  = resistividade elétrica ( $\Omega \cdot m$ );

R = resistência elétrica ( $\Omega$ );

A = área da face do corpo de prova em contato com os eletrodos ( $m^2$ );

d = distância entre eletrodos (m).

As medidas de resistividade foram realizadas nas argamassas saturadas. No dia da medição, o excesso de água da superfície da amostra foi seco com um papel absorvente, em seguida, a amostra foi posicionada no dispositivo com os eletrodos na marcação  $0^\circ$ , e a medida foi realizada. Posteriormente o mesmo corpo de prova foi rotacionado ao passo de  $90^\circ$  até completar quatro medições (Figura 34). Imediatamente após as medições a amostra era colocada novamente no recipiente contendo água saturada com cal, e a amostra seguinte era retirada para a continuidade do ensaio. Esse procedimento foi adotado para evitar a perda de água da amostra e garantir o grau de saturação. Foram utilizados 6 corpos de prova por composição, totalizando assim 24 medições.

### **3.3.2.9 Condutividade elétrica e pH.**

A condutividade elétrica é a propriedade inversa da resistividade elétrica, ou seja, traz informações sobre a facilidade de um material em conduzir a corrente elétrica. No caso de materiais cimentícios, a condutividade elétrica é influenciada grandemente pela composição da solução de água de poros, a qual depende da composição química dos materiais constituintes da matriz, como por exemplo, do tipo de cimento, das adições, dos agregados, e aditivos.

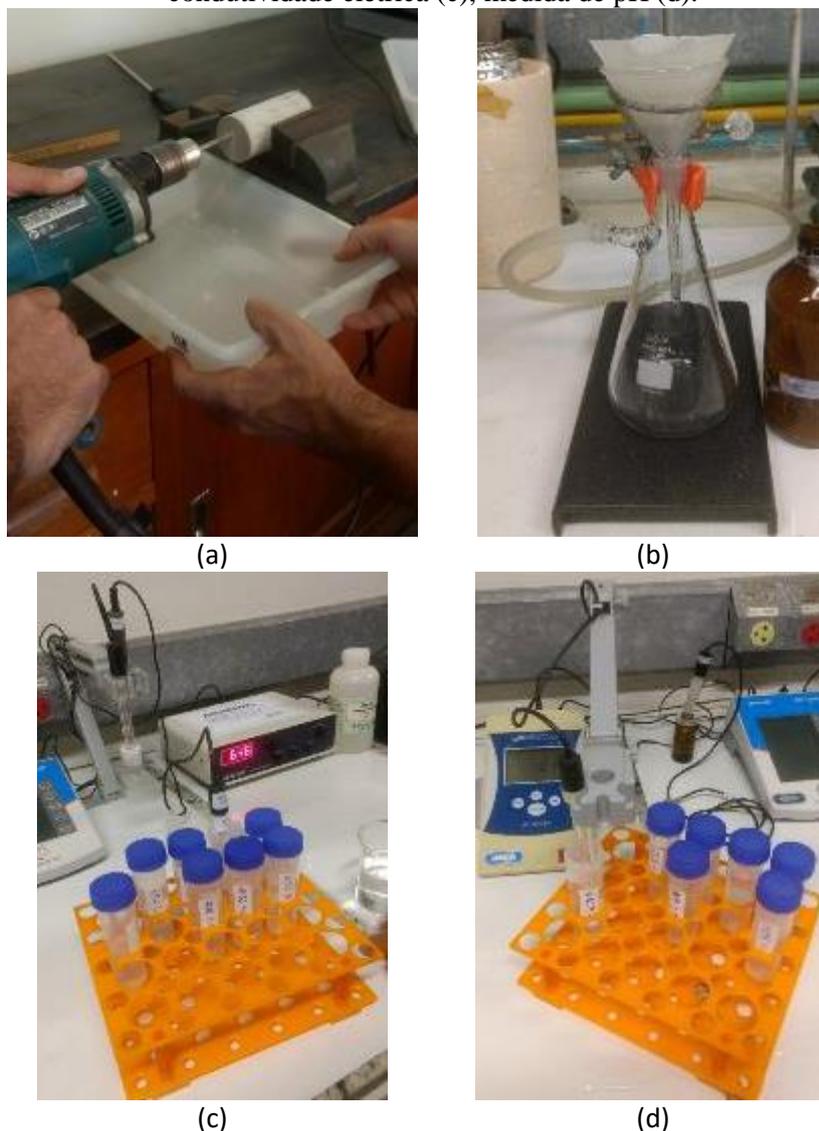
Sabe-se que o pH da solução de água de poros dos materiais cimentícios é altamente alcalino (cerca de 12,5). Essa elevada alcalinidade é responsável por passivar e manter a proteção do aço no interior do concreto.

A utilização de novos materiais na composição de concretos e argamassas pode alterar essas propriedades. Dentro desse contexto, nesse trabalho verificou-se a influência da utilização da ACBC na condutividade elétrica e no pH das argamassas.

Após o ensaio de resistividade elétrica das argamassas aos 365 dias, os corpos de prova foram secos em estufa a temperatura de  $100^\circ C$  e com o auxílio de uma furadeira foi extraído material em pó das amostras (Figura 35 (a)). O material extraído foi peneirado

(malha 0,075 mm), homogeneizado e as soluções foram preparadas a partir de uma proporção de 3 : 10 (massa de material : massa de água deionizada). As soluções foram mantidas em agitação constante por 24 horas e filtradas em seguida (Figura 35 (b)). Após a obtenção das soluções, determinou-se a condutividade elétrica (Figura 35 (c)) e o pH das soluções (Figura 35 (d)). Foi utilizado um pHmetro de bancada da marca DENVER, modelo UB-19 e um condutivímetro ANALION, modelo C708 e constante de célula de  $1\text{cm}^{-1}$ .

Figura 35- Extração do pó das argamassas (a), filtragem da solução (b), medida de condutividade elétrica (c), medida de pH (d).



### 3.3.2.10 Previsão da permeabilidade das argamassas

Nesse trabalho, a permeabilidade das argamassas foi prevista pelo modelo de Katz e Thompson (1986), conforme descrito no item 2.3.2, Equação 7.

### 3.3.2.11 Microscopia eletrônica de varredura.

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizado na argamassa de referência (sem ACBC) e na composição que apresentou os melhores resultados nos experimentos realizados (composição 30% ACBC).

O corpo de prova foi rompido com o auxílio de um martelo e o fragmento foi colado no porta amostra com uma fita de carbono. Ambas as amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro (Figura 36).

As análises foram executadas em microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (FEG), marca FEI, modelo Quanta 400. As imagens foram obtidas utilizando detector de elétrons secundários (SE) e de elétrons retroespalhados (BSED), em condições de tensão de aceleração de 20 kV e distância de trabalho (WD) de aproximadamente 10 mm. O espectroscópio de raios X (EDX) utilizado é da marca EDAX.

Figura 36- Amostras de argamassas utilizadas no MEV.



## 3.4 3ª Fase: Solução de água de poros

Nesta etapa serão descritos os procedimentos metodológicos realizados para analisar a passivação do aço imerso em solução de água de poros com e sem ACBC. Da mesma forma dos ensaios de MEV, as análises foram realizadas para a composição de referência e para a composição 30% ACBC.

### 3.4.1 Preparação das soluções de água de poro das argamassas.

Os ensaios eletroquímicos foram conduzidos em soluções que simulavam a composição da água de poro das argamassas. Para isso utilizou-se o procedimento para a extração dos compostos solúveis da fase argamassa (MIGNON et al., 2015; SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012; SCHRÖFL; SNOECK; MECHTCHERINE, 2017;

SNOECK et al., 2012). Realizou-se a mistura dos materiais secos (cimento, areias e ACBC) correspondentes aos traços de Referência (0% ACBC) e 30% ACBC na proporção de 3 : 10 (materiais secos: água). As quantidades de materiais utilizados podem ser visualizadas na Tabela 17.

Tabela 17- Proporção de materiais utilizados para a obtenção das soluções de extração dos compostos solúveis da fase argamassa.

Nome	Água (mL)	Cimento (g)	Areia Média (g)	Areia Fina (g)	ACBC (g)
<b>Solução de Referência</b>	250	18,750	30,938	25,313	---
<b>Solução 30% ACBC</b>	250	18,750	30,938	17,813	7,688

As misturas foram realizadas em um Becker e mantidas sobre agitação constante por 24 horas utilizando-se um agitador magnético da FISATOM (Figura 37 (a)). Em seguida, as mesmas foram filtradas utilizando-se um sistema de filtragem com baixa pressão (Figura 37 (b)), assim a fase sólida retida no papel filtro foi descartada e a sobrenadante contendo apenas a solução composta de água com os componentes solúveis da fase argamassa foi armazenada (Figura 37 (c)).

Figura 37- Preparo das soluções: agitação (a), filtragem (b), aspecto da solução pronta (c)



(a)



(b)



(c)

Após o preparado, foram determinados o pH e a condutividade elétrica das soluções. O potencial hidrogênio iônico das soluções foi determinado utilizando um pHmetro da DENVER INSTRUMENT (UB-10) e a condutividade iônica das soluções foi determinada com o auxílio de um condutímetro da ANALION (C708).

### 3.4.2 Preparação do eletrodo de trabalho e célula eletroquímica.

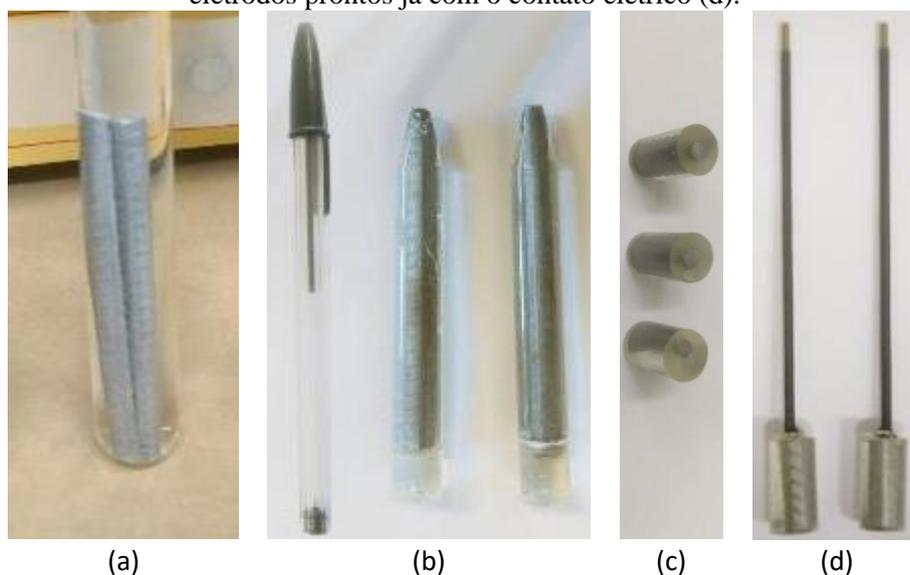
Nesse trabalho foi utilizado o aço CA60 com diâmetro de 5 mm como eletrodo de trabalho. O aço passou por um processo de limpeza para remoção dos óxidos de acordo com as especificações da ASTM G1-03 (ASTM, 2011). A limpeza foi realizada no

Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica Cerâmica (LIEC), seguindo as seguintes etapas:

- Imersão em solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina, por 10 minutos;
- Lavagem em água destilada;
- Imersão em acetona por 2 minutos;
- Secagem em jato de ar quente.

Após a limpeza, o eletrodo de trabalho foi confeccionado de acordo com Zimer (2009). A barra de aço foi embutida em uma resina epóxi transparente fornecida pela POLIPOX (Resina RL-3028 e catalisador EL-3041), e após o tempo de cura de 24 h os eletrodos foram retirados da forma e cortados. O contato elétrico foi realizado com uma haste de latão, que posteriormente foi protegido com uma resina isolante e impermeabilizante da QUIMATIC TAPMATIC. Antes dos ensaios eletroquímicos, a superfície exposta foi lixada usando lixas de carvão com granulometria de 120, 240, 400, 600, 1200 e 2000 sob fluxo de água, e polidas com feltros e suspensões de alumina de 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  e 0,25  $\mu\text{m}$  com a finalidade de obter uma superfície mais lisa e regular, e garantir uma melhor reprodutibilidade das superfícies. Na Figura 38 estão representadas algumas etapas do processo de fabricação do eletrodo de trabalho.

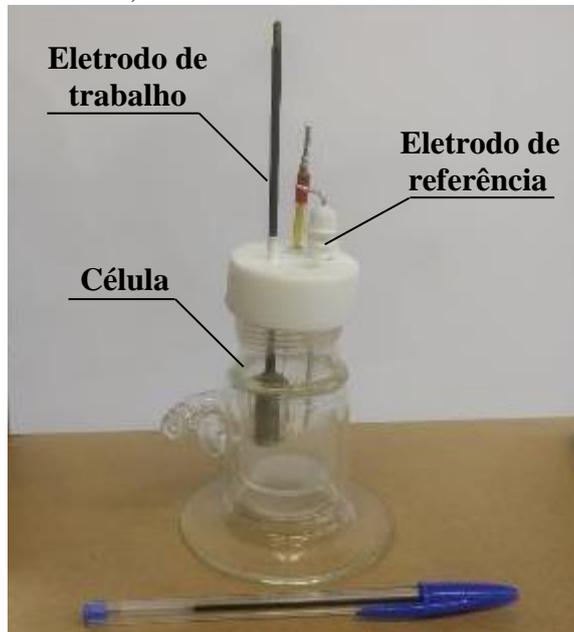
Figura 38- Processo de confecção do eletrodo de trabalho. Barras de CA-60 imersas na solução decapante (a), aço limpo embutido na resina epóxi (b), eletrodos cortados transversalmente (c) e eletrodos prontos já com o contato elétrico (d).



Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma célula eletroquímica com capacidade de 50 ml, um eletrodo de referência de  $\text{Hg}/\text{HgO}:\text{KOH } 0.1\text{M}$  ( $E_0 = + 0,165 \text{ V}$  vs  $\text{H}_2/\text{H}^+$  e  $\Delta E(\text{SCE}) = +0,076 \text{ V}$ ) e o eletrodo de trabalho (Figura 39). Vale salientar que

o eletrodo de mercúrio foi utilizado como referência devido a sua melhor estabilidade em meio alcalino do que o eletrodo de calomelano saturado (SCEsat -  $E_0 = + 0,244 \text{ V vs H}_2/\text{H}^+$ ) (BARD, A. J.; FAULKNER, 2000).

Figura 39- Célula, eletrodo de trabalho e eletrodo de referência.



### 3.4.3 Potencial de circuito aberto (PCA)

A medida do PCA foi realizada em meio das soluções obtidas da extração dos compostos solúveis da fase argamassa dos traços de REF e 30% ACBC usando como referência o eletrodo de  $\text{Hg}/\text{HgO}|\text{KOH } 0,1 \text{ M}$ . O monitoramento foi realizado em um potenciostato da METHROM AUTOLAB, PGSTAT 30, acoplado a um microcomputador com o software Nova v1.11, sendo que os dados do PCA foram registrados a cada 2 minutos durante um período de 5 dias. A temperatura das soluções foi mantida constante e igual a  $25^\circ\text{C}$  durante a realização de todos os experimentos.

### 3.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As imagens de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas com um microscópio da FEI modelo F50 *Inspect* equipado com detector de silício. Amostras do aço CA60 de  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  foram imersas nas soluções durante 5 dias para a formação do filme passivador. Após esse período, as amostras foram lavadas por imersão em água para a remoção da solução, secas no dessecador e coladas nos porta amostras de alumínio utilizando uma resina epóxi condutora a base de prata. Através da sonda EDS, foi possível

identificar os principais elementos químicos que compõe os filmes passivadores e realizar um mapeamento para visualizar a distribuição desses elementos nas regiões delimitadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização da ACBC

#### 4.1.1 Massa específica e distribuição granulométrica.

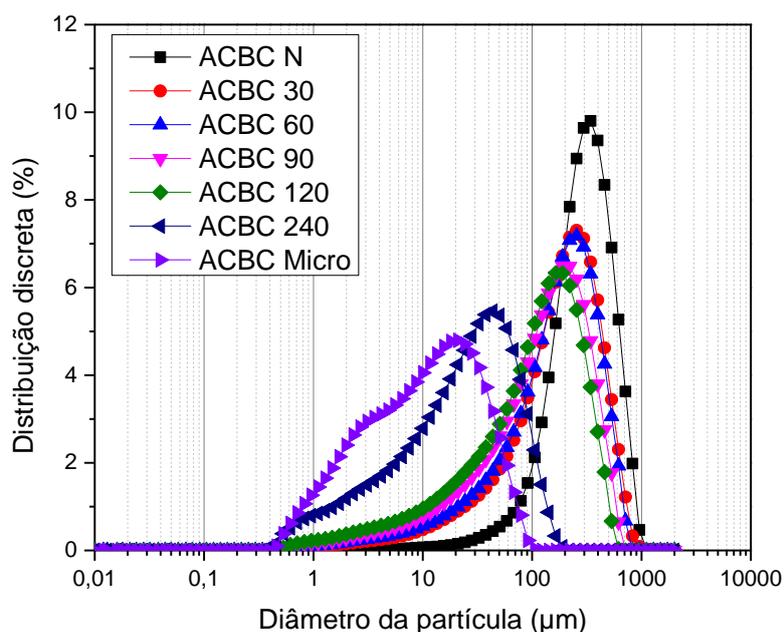
Os valores obtidos para a massa específica e os parâmetros D10, D50 e D90 da distribuição granulométrica das amostras de ACBC estão apresentados na Tabela 18. Os parâmetros D10, D50 e D90 referem-se ao tamanho abaixo do qual se encontra 10%, 50% e 90% do volume de material, respectivamente.

Tabela 18- Massa específica e parâmetros granulométricos da ACBC.

Amostras	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	D10 (µm)	D50(µm)	D90(µm)
ACBC N	2,68	110,43	277,43	550,73
ACBC 30	2,67	29,17	174,29	421,95
ACBC 60	2,68	24,38	162,27	395,74
ACBC 90	2,68	15,34	124,46	331,03
ACBC 120	2,68	11,12	104,43	285,05
ACBC 240	2,69	2,43	22,79	73,27
ACBC MICRO	2,70	1,57	10,10	37,84

A distribuição granulométrica discreta das amostras de ACBC estão apresentadas na Figura 40. A moagem da ACBC foi realizada com o intuito de obter um material com partículas inferiores a 125 µm, buscado com isso preencher o “gap” existente entre o agregado miúdo e cimento.

Figura 40- Distribuição granulométrica discreta das amostras de ACBC.



Como pode ser observado na Figura 40, apenas as amostras ACBC 240 e ACBC MICRO apresentaram distribuição granulométrica adequada para a aplicação desejada.

#### 4.1.2 Espectroscopia de Fluorescência de raios-X (FRX).

A composição química das amostras de ACBC utilizadas nessa pesquisa e também das amostras utilizadas por Sales & Lima (2010) podem ser verificadas na Tabela 19. Vale salientar que todas essas cinzas são originárias das caldeiras de usinas sucroalcooleiras, ou seja, são cinzas pesadas que contém grande quantidade de areia em sua composição. Todas as amostras de ACBC apresentaram elevado teor de  $\text{SiO}_2$  ( $\geq 91,3\%$ ) e baixa perda ao fogo ( $\leq 1,3\%$ ). A composição química das amostras utilizadas é similar às cinzas estudadas por Sales & Lima (2010).

Tabela 19- Composição química da ACBC utilizada e cinzas utilizadas na pesquisa de Sales & Lima (2010).

Elementos	ACBC N	ACBC 30	ACBC 60	ACBC 90	ACBC	ACBC	ACBC	Amostras (SALES; LIMA, 2010)		
	(%)	(%)	(%)	(%)	120 (%)	240 (%)	Micro (%)			
$\text{SiO}_2$	94,6	94,8	94,7	95,1	94,9	91,3	94,3	88,2	96,2	93,5
CaO	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,6	0,1	0,4
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,9	2,6	2,6	2,3	2,4	3,0	2,8	5,1	1,7	2,6
$\text{SO}_3$	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1
$\text{K}_2\text{O}$	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	1,3	0,3	0,8
$\text{TiO}_2$	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	-	< 0,1
MgO	-	-	-	-	-	0,2	-	0,4	0,6	0,3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-	-	-	-	-	2,3	-	2,3	0,2	1,2
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-
PF <sup>1</sup>	0,34	0,74	0,82	0,87	0,89	1,30	0,70	0,35	1,04	0,34

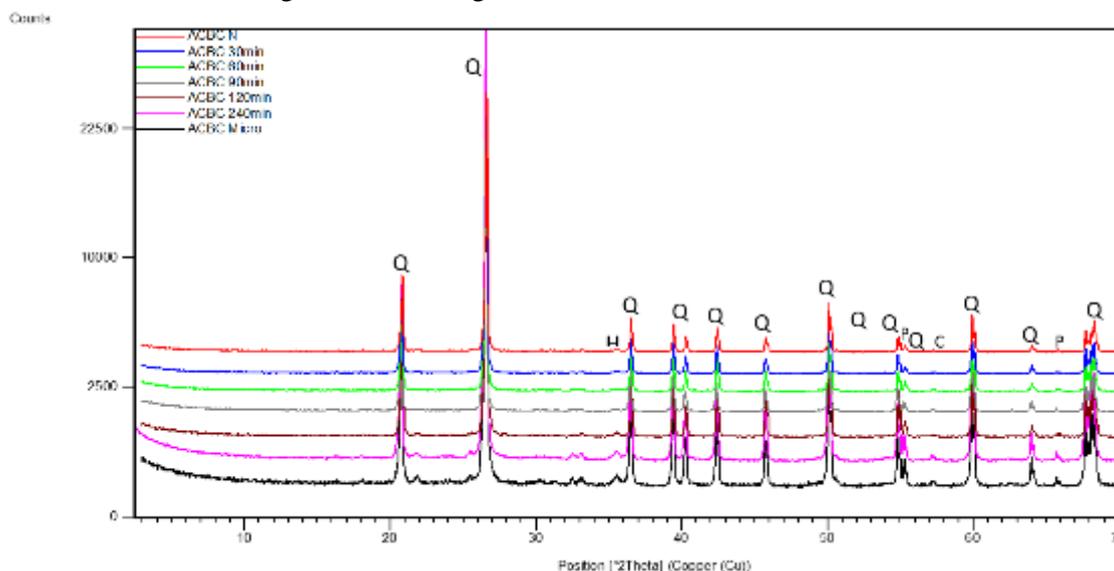
<sup>1</sup> Perda ao fogo.

#### 4.1.3 Difração de raios-X (DRX).

O ensaio de difração de raios-X foi realizado com o intuito de identificar as fases cristalinas existentes na ACBC. Pode-se verificar no difratograma representado pela

Figura 41 picos característicos de quartzo (Q) de elevada intensidade, evidenciando assim o quartzo como mineral predominante na composição da ACBC. Também foram identificados picos característicos, mas de baixa intensidade, de hematita (H), cristobalita (C) e pseudobruquita (P). Não foi possível identificar diferença entre os picos das amostras de ACBC moídas em diferentes tempos, ou seja, a moagem não favoreceu o aumento de materiais amorfos na composição da ACBC. A existência de picos bem definidos e ausência de halo amorfo caracterizam o elevado grau de cristalinidade desse material.

Figura 41- Difratomogramas das amostras de ACBC.



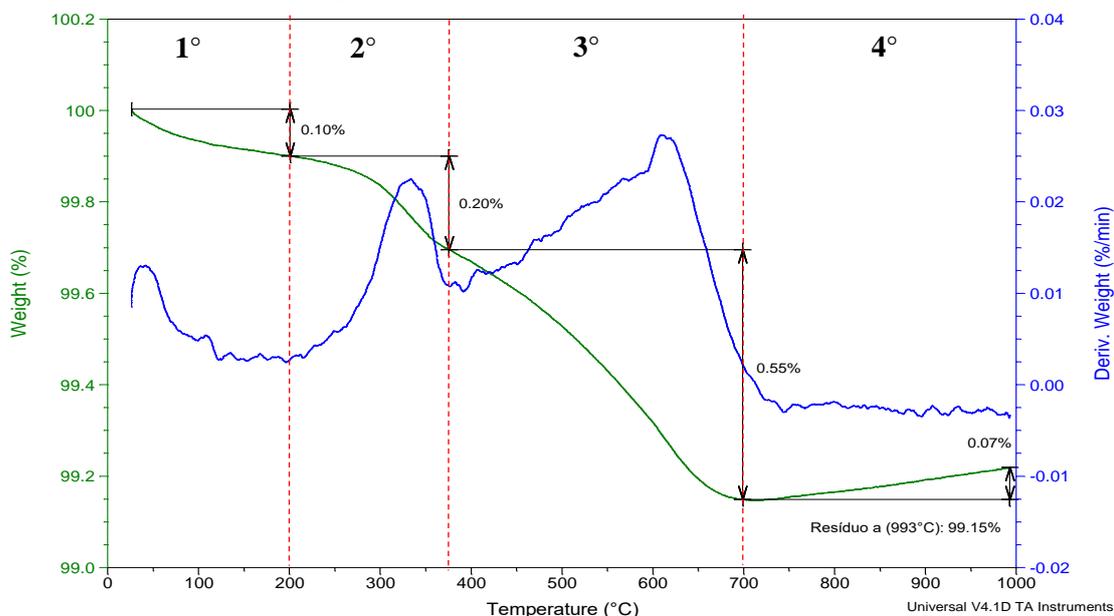
Na análise quantitativa das fases cristalinas pelo método Rietveld identificou-se que as amostras de ACBC são compostas por 96% de quartzo. Além da análise quantitativa das fases cristalinas, determinou-se o teor de material amorfo existente na ACBC 240. A amostra apresentou um teor de 31,8% de material amorfo e 68,2% de material cristalino, ou seja, a ACBC é um material predominantemente cristalino. Vale salientar que a determinação do teor de amorfo foi realizada apenas na amostra que foi selecionada para dar continuidade às etapas posteriores desse estudo.

#### 4.1.4 Análise termogravimétrica (TG).

No ensaio de termogravimetria foram observadas quatro transições principais, as quais estão indicadas na Figura 42. A primeira transição está associada à perda de água livre (temperatura até 100°C). O segundo trecho de perda acentuada de massa (entre 200°C a 375°C) pode estar associado à decomposição de compostos orgânicos da cinza,

como a hemicelulose, celulose e lignina (ANJOS, 2009). O terceiro trecho de perda de massa está associado às transformações do quartzo. A forma mais estável de quartzo na temperatura ambiente é alfa, e a mudança de quartzo alfa para quartzo beta ocorre na temperatura de 573°C, o qual fica estável até a temperatura de 870°C. A partir desse ponto ocorre a transformação do quartzo beta em tridimita, e a transformação da tridimita em cristobalita ocorre a partir de 1470°C e o ponto de fusão em 1713°C (LOBATO, 2009). Na última transição da curva (a partir de 700°C) ocorreu um ganho de massa, o qual pode estar associado a oxidação do Ferro, correspondente a transformação da magnetita em hematita (KETTELER et al., 2001). Esses resultados corroboram com a análise por difração de raios-X, ou seja, o material é composto essencialmente por quartzo, que é estável e não apresenta praticamente perda de massa ao ser aquecido até 1000°C.

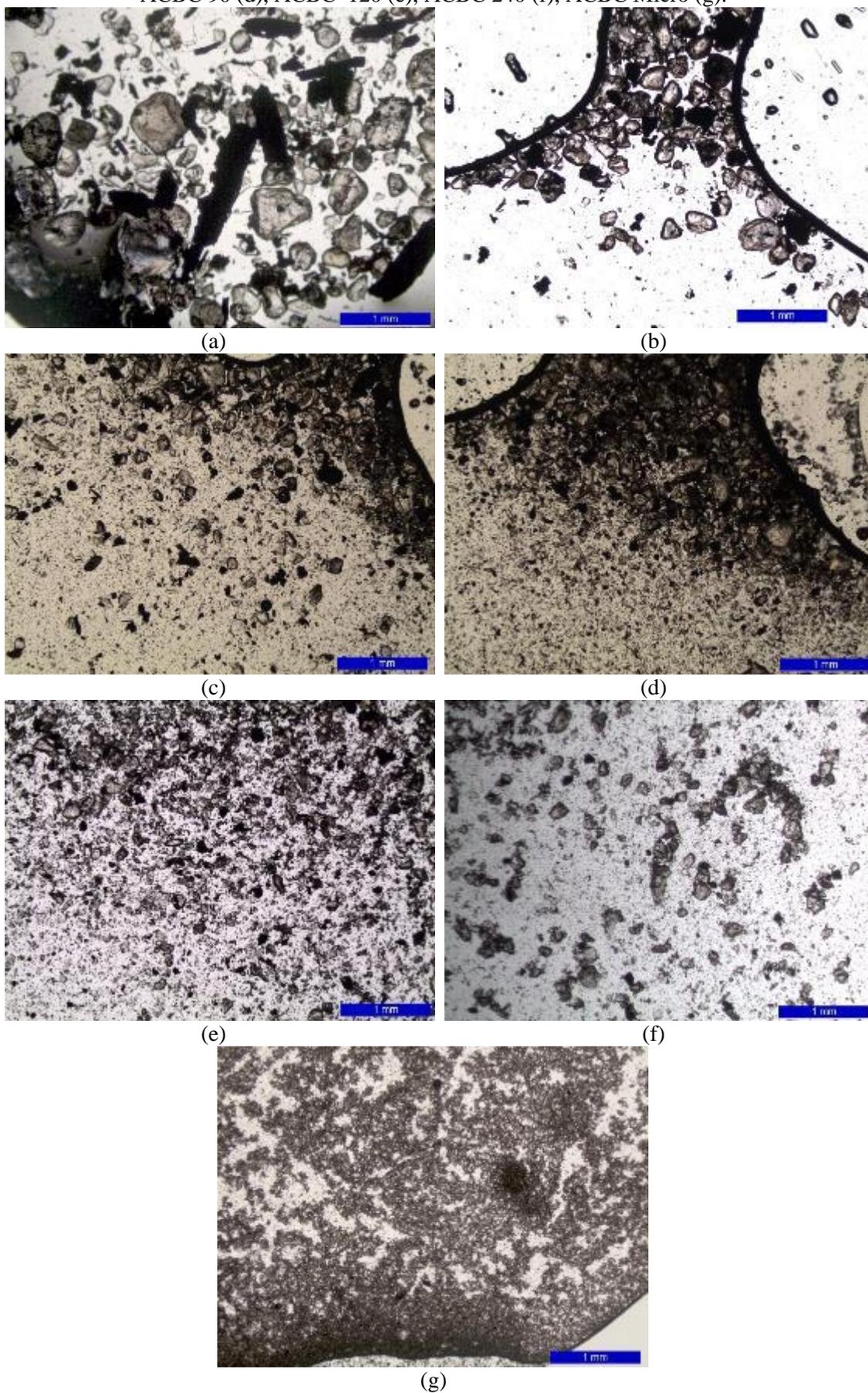
Figura 42- Curvas TG/DTG da ACBC.



#### 4.1.5 Microscopia ótica.

Nas imagens obtidas por microscópio ótico (Figura 43), foi possível observar a redução de tamanho das partículas de ACBC considerando as diferentes moagens. Na amostra natural (ACBC N), observou-se partículas maiores de quartzo e também partículas alongadas que aparentam ser bagaço não calcinado totalmente. Para as demais amostras (ACBC 30, ACBC 60, ACBC 90, ACBC 120, ACBC 240, e ACBC Micro), conforme esperado, observou-se um aumento na quantidade de finos, principalmente para a amostra ACBC Micro.

Figura 43- Micrografias das amostras de ACBC: ACBC N (a), ACBC 30 (b), ACBC 60 (c), ACBC 90 (d), ACBC 120 (e), ACBC 240 (f), ACBC Micro (g).



#### 4.1.6 Potencial hidrogeniônico (pH).

Os resultados obtidos no ensaio de pH podem ser verificados na Tabela 20. Todas as amostras podem ser consideradas como resíduo não corrosivo, pois apresentaram valores de pH dentro dos limites estipulados pela NBR 10004:2004 (ABNT, 2004) ( $2 < \text{pH} < 12,5$ ). Também foram determinados os valores de pH da areia fina e areia média (Tabela 20). Ao comparar os resultados observa-se que as areias estão na faixa de pH considerada como meio ácido, e as amostras de ACBC estão na faixa considerada como meio básico.

Tabela 20- pH das amostras de ACBC e areias.

Amostra	pH	Slope do eletrodo (%)	Coefficiente de variação	Desvio padrão (%)
ACBC N	8,7	93,0	0,2	2,8
ACBC 30	8,5	90,8	0,4	4,4
ACBC 60	9,0	90,9	0,1	1,0
ACBC 90	9,1	90,8	0,1	0,8
ACBC 120	9,2	90,9	0,1	0,6
ACBC 240	9,2	94,4	0,0	0,1
ACBC MICRO	9,2	94,4	0,1	0,6
AREIA FINA	4,9	93,9	0,3	5,4
AREIA MÉDIA	5,7	93,9	0,1	0,9

#### 4.1.7 Atividade pozolânica da ACBC.

As reatividades das cinzas foram verificadas pelos seguintes ensaios: Chapelle modificado, índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal, e IAP com o cimento Portland.

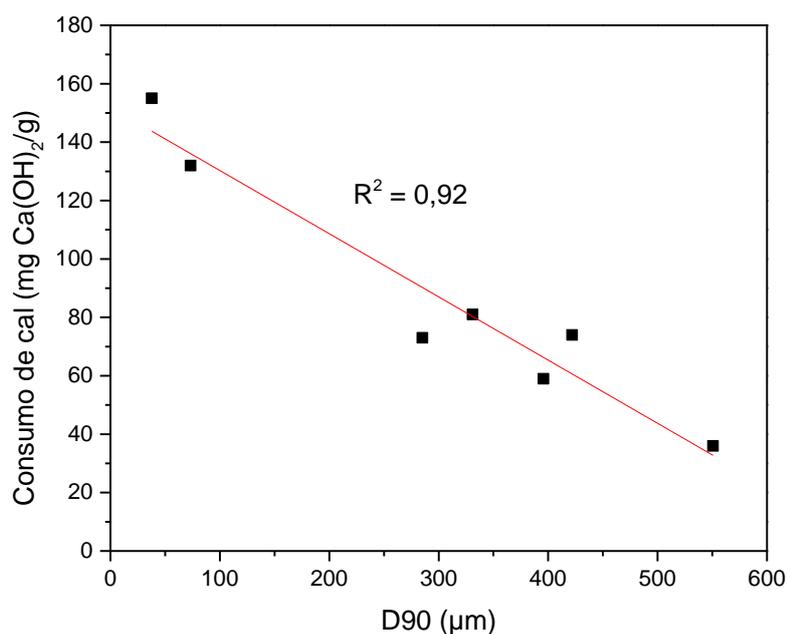
Os resultados obtidos no ensaio de Chapelle para as amostras de ACBC podem ser visualizados na Tabela 21. Todas as amostras de ACBC apresentaram baixo consumo de cal. O resultado obtido foi comparado com o consumo mínimo de cal exigido para metacaulins, o qual deve ser de 700 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  de metacaulim (FERRAZ et al., 2015). Pode-se observar na Tabela 21 que mesmo para a amostra de menor granulometria (ACBC MICRO), o consumo de cal corresponde a 22,1% do consumo mínimo exigido para metacaulins.

Tabela 21- Resultados obtidos no ensaio de Chapelle Modificado.

Amostras de ACBC	Consumo de cal (mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g)	Índice de desempenho (%)
ACBC N	36	5,1
ACBC 30	74	10,6
ACBC 60	59	8,4
ACBC 90	81	11,6
ACBC 120	73	10,4
ACBC 240	132	18,9
ACBC MICRO	155	22,1

Apesar do baixo consumo de cal identificado no ensaio de Chapelle, foi possível verificar que a redução no tamanho das partículas levou a um aumento da reatividade e/ou efeito fíler da ACBC. Esse mesmo comportamento foi identificado nas cinzas de bagaço de cana-de-açúcar estudadas por Cordeiro et al. (2009). Na Figura 44 pode-se verificar que a relação entre o parâmetro D90 e o consumo de cal apresentou boa correlação ( $R^2=0,92$ ).

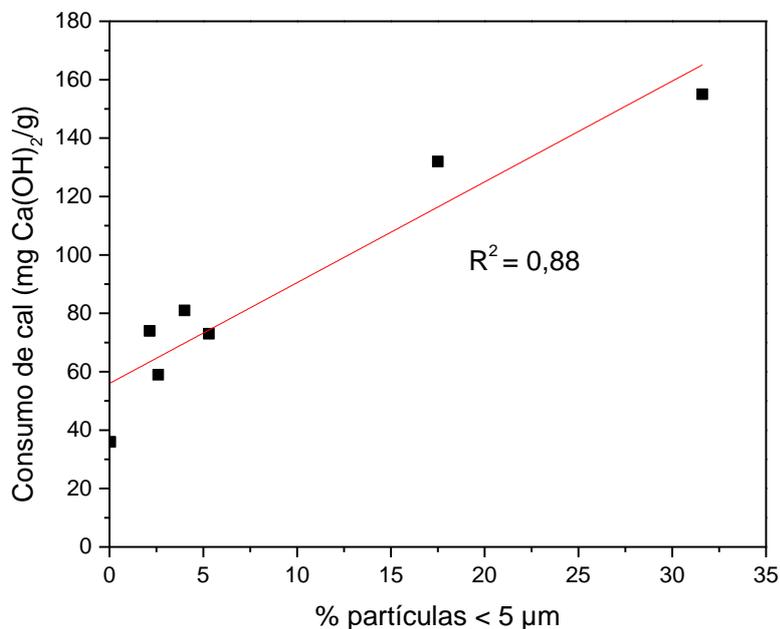
Figura 44- D90 versus consumo de cal.



O material utilizado nesta pesquisa apresentou elevada quantidade de quartzo, e, segundo Benezet & Benhassaine (BENEZET, J. C., BENHASSAINE, 1999), esse material não pode ser considerado um material inerte. Os pesquisadores afirmam que grãos de sílica cristalina reagem com a cal, especialmente as partículas de dimensão inferior a 5 µm. Com base nessa informação, considerou-se a quantidade de partículas

com dimensão inferior a 5  $\mu\text{m}$  e o consumo de cal para cada amostra de ACBC. Pode-se observar na Figura 45 uma boa correlação entre os dados ( $R^2 = 0,88$ ).

Figura 45- Porcentagem de partículas menores que 5  $\mu\text{m}$  versus consumo de cal.



Para verificar o IAP com a cal e com o cimento, foram utilizadas as seguintes amostras: ACBC N, ACBC 120, ACBC 240 e ACBC Micro.

Os resultados obtidos no ensaio de IAP com a cal estão apresentados na Tabela 22. O índice de atividade pozolânica com a cal também foi abaixo do necessário em todas as amostras. As amostras ACBC N e ACBC 120 se romperam durante a desforma, ou seja, não apresentaram nenhuma resistência. Mesmo para a amostra ACBC Micro, a resistência foi de apenas 2 MPa, sendo que esse valor corresponde a 1/3 do valor necessário (6 MPa) para o material ser considerado como pozolana, de acordo com as especificações da NBR 12653:2014 (ABNT, 2014a).

Tabela 22- Índice de atividade pozolânica com a cal.

Amostras de ACBC	Resistência à compressão (MPa)	% em relação ao mínimo necessário
ACBC N	-	-
ACBC 120	-	-
ACBC 240	0,39	6,5
ACBC Micro	2,07	33,3

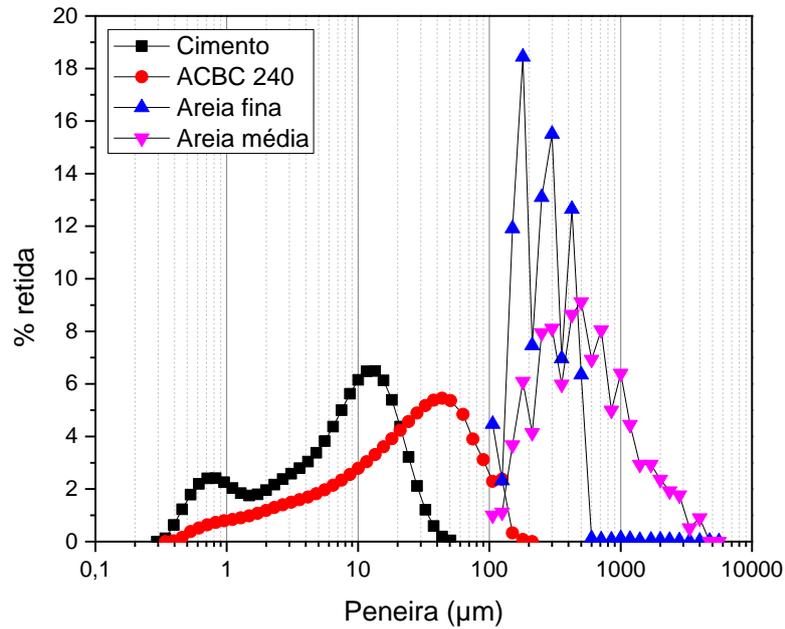
As amostras de ACBC também não atingiram o índice de desempenho mínimo com o cimento Portland, valor que corresponde a 90 % da resistência da argamassa de controle. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 23.

Tabela 23- Índice de desempenho com cimento Portland.

Amostras	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Índice de desempenho (%)
Controle	45,83	2,03	4,43	-
ACBC N	28,60	0,67	2,35	57,3
ACBC 120	29,07	0,78	2,68	59,6
ACBC 240	28,47	1,49	5,24	55,2
ACBC Micro	33,68	0,98	2,92	73,3

As amostras de ACBC não apresentaram os índices mínimos necessários para serem consideradas como materiais pozolânicos. Portanto, nesse trabalho a ACBC foi aplicada em substituição parcial (em volume) do agregado miúdo natural na produção de argamassas. Escolheu-se a amostra onde a distribuição granulométrica se enquadrava entre a areia fina e o cimento, com o intuito de preencher o “gap” granulométrico existente (Figura 46). Dessa forma, utilizou-se a amostra ACBC 240 para dar prosseguimento ao presente estudo.

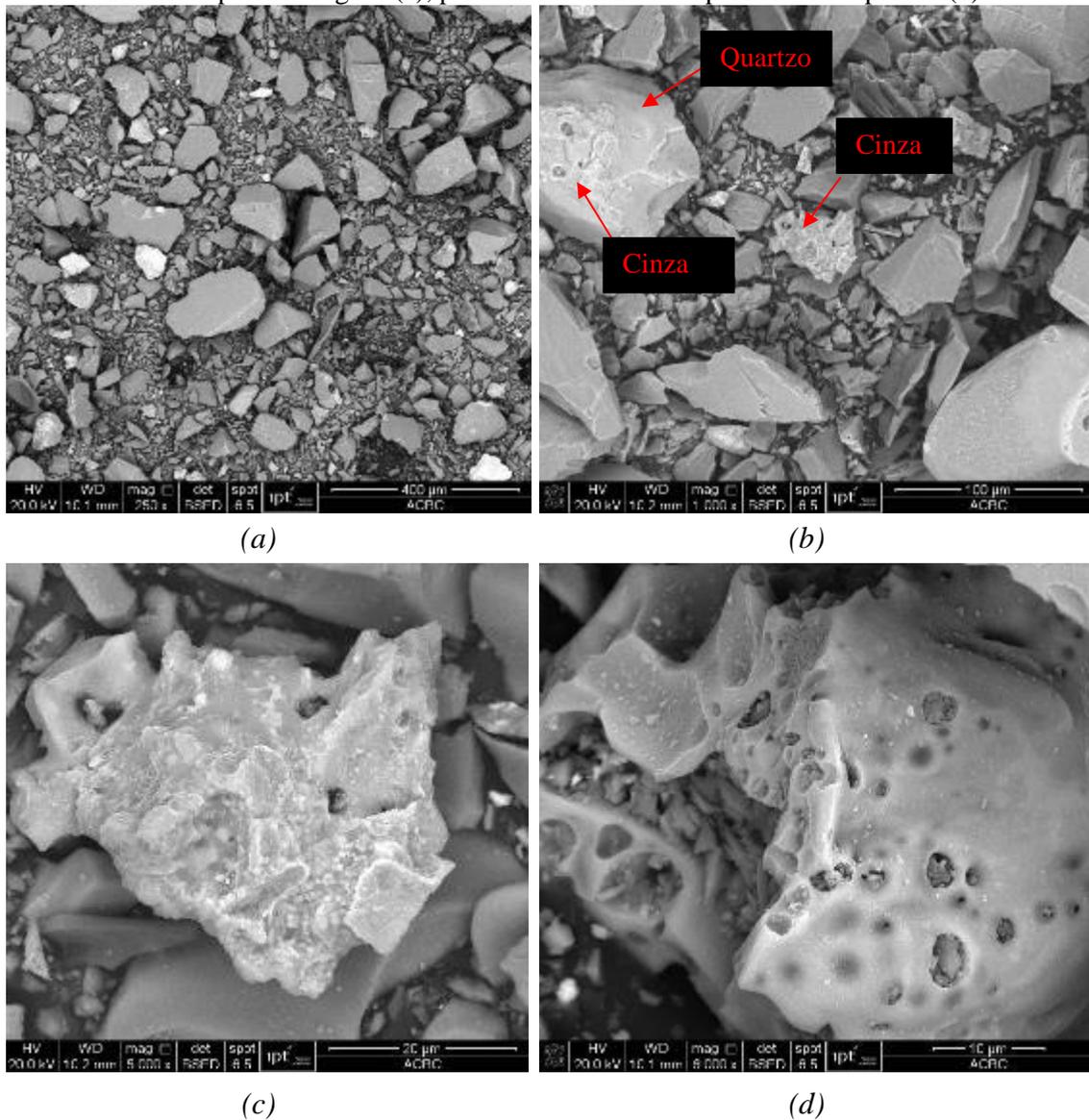
Figura 46- Distribuição granulométrica dos materiais.



#### 4.1.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microanálise EDS.

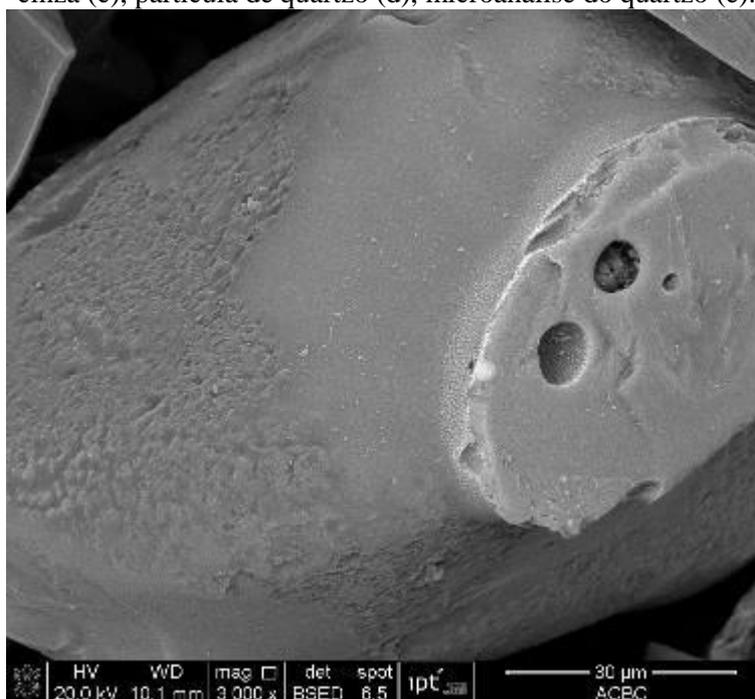
Para a amostra de ACBC selecionada (ACBC 240), foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura e microanálise EDS. A ACBC é composta principalmente por quartzo (Figura 47 (a) e (b)) com dimensões de partículas variadas. Também foram identificadas partículas de cinza com morfologias diferentes. Na Figura 47 (c) é possível observar uma partícula de cinza de superfície rugosa, e na Figura 47 (d), observa-se uma partícula de cinza com superfície mais lisa e porosa.

Figura 47- Micrografia da ACBC: partículas de quartzo (a), partículas de cinza (b), partícula de cinza de superfície rugosa (c), partícula de cinza de superfície lisa e porosa (d).

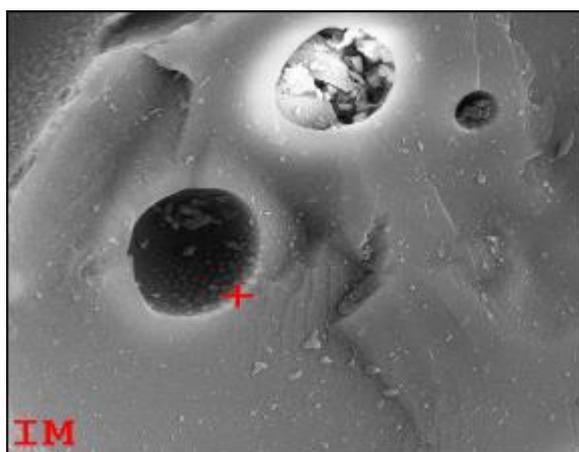


Por meio da imagem obtida no MEV e microanálise EDS, foi possível identificar partículas de cinza aderidas às partículas de quartzo (Figura 48 (a)). Nesse local foi lançada a sonda EDS (cruz vermelha) e elementos identificados na microanálise da cinza e do quartzo que estão apresentados na Figura 48 (b) e (c), e Figura 48 (d) e (e), respectivamente. Os resultados obtidos na microanálise EDS corroboram com os resultados de fluorescência de raios-X, sendo que ambos identificaram traços de silício, ferro, alumínio, cálcio, potássio, titânio e magnésio.

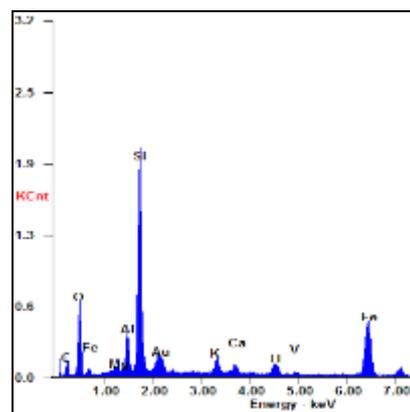
Figura 48- Partícula de cinza aderida ao quartzo (a), partícula de cinza (b), microanálise da cinza (c), partícula de quartzo (d), microanálise do quartzo (e).



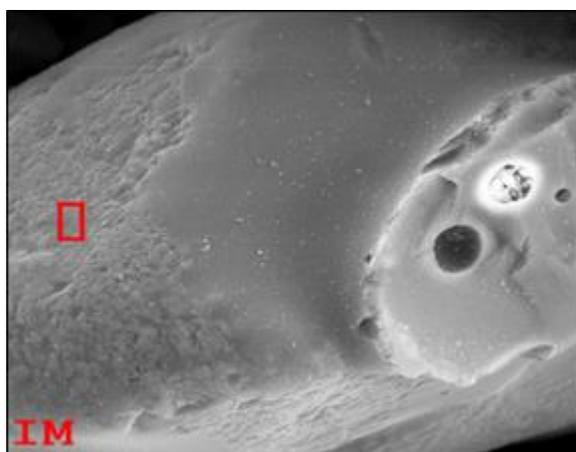
(a)



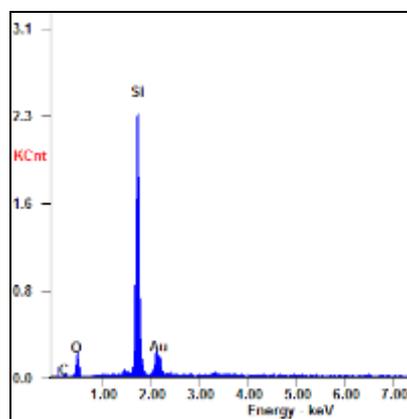
(b)



(c)



(d)



(e)

## **4.2 Propriedades das argamassas**

### **4.2.1 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas**

A caracterização das argamassas no estado endurecido foi realizada pelos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica nas idades de 7, 28 e 1 dias. Os resultados podem ser verificados na Tabela 24. Não foram observadas diferenças nos resultados de absorção de água e índice de vazios entre as argamassas nas diferentes idades, ou seja, o incremento no teor de ACBC não interferiu na porosidade total das argamassas. Em relação a massa específica, verifica-se que o incremento no teor de ACBC leva a um pequeno aumento nos valores de massa específica. A ACBC apresentou um valor de massa específica levemente superior a massa específica da areia fina, contribuindo assim com esse leve aumento observado nas argamassas. De modo geral, pode-se concluir que a ACBC não interferiu nas características físicas das argamassas. No anexo A estão apresentados os dados utilizados para a determinação dos resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica para cada amostra utilizada.

Tabela 24- Resultados do ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios, e massa específica das argamassas nas idades de 7, 28 e 91 dias.

<b>7 dias</b>									
Traços	Absorção de água por imersão			Índice de vazios			Massa específica		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (Kg/m <sup>3</sup> )	DP (Kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
0% ACBC	8,5	0,0	0,5	17,3	0,1	0,3	2036,6	3,0	0,1
10% ACBC	8,5	0,2	1,9	17,4	0,3	1,6	2045,9	6,7	0,3
20% ACBC	8,6	0,1	1,3	17,6	0,2	1,1	2049,1	5,7	0,3
30% ACBC	8,4	0,1	0,6	17,3	0,1	0,7	2060,5	4,6	0,2
40% ACBC	8,5	0,1	0,7	17,5	0,1	0,7	2055,8	4,8	0,2
<b>28 dias</b>									
Traços	Absorção de água por imersão			Índice de vazios			Massa específica		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (Kg/m <sup>3</sup> )	DP (Kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
0% ACBC	8,5	0,1	0,8	17,4	0,1	0,7	2033,0	3,2	0,2
10% ACBC	8,4	0,1	1,1	17,3	0,2	0,9	2051,7	6,1	0,3
20% ACBC	8,4	0,1	0,3	17,2	0,1	0,3	2056,3	1,2	0,1
30% ACBC	8,3	0,1	0,7	17,2	0,1	0,6	2063,4	3,2	0,2
40% ACBC	8,6	0,2	2,4	17,7	0,4	2,0	2057,1	9,4	0,5
<b>91 dias</b>									
Traços	Absorção de água por imersão			Índice de vazios			Massa específica		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (Kg/m <sup>3</sup> )	DP (Kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
0% ACBC	8,2	0,1	1,3	16,8	0,2	1,2	2045,5	3,4	0,2
10% ACBC	7,9	0,1	1,0	16,2	0,1	0,6	2058,5	7,5	0,4
20% ACBC	8,2	0,4	4,5	16,8	0,7	4,3	2050,8	5,4	0,3
30% ACBC	8,3	0,1	0,9	17,2	0,2	1,1	2054,8	5,4	0,3
40% ACBC	8,5	0,1	1,2	17,4	0,2	1,1	2059,9	3,6	0,2

#### 4.2.2 Resistência à compressão.

Os resultados médios de resistência à compressão das argamassas nas idades de 7, 28, 91 e 365 dias estão apresentados na Tabela 25 e Figura 49. No anexo B estão apresentados os dados individuais de resistência à compressão para cada amostra utilizada. Na idade de 7 dias, as argamassas 20% ACBC e 40% ACBC apresentaram um aumento de 10,4% e 13,5%, respectivamente, em relação à argamassa de referência (0% ACBC). Por outro lado, os traços 10% ACBC e 30% ACBC apresentaram uma redução de 5,5% e 4,7%, respectivamente, também em relação à argamassa de referência.

Na idade de 28 dias, todos os traços produzidos com a ACBC apresentaram resultados superiores à referência. O aumento de resistência para os traços 10% ACBC,

20% ACBC, 30% ACBC e 40% ACBC foi de 6,8%, 5,5%, 8,6% e 9,7%, respectivamente, em relação à argamassa 0% ACBC.

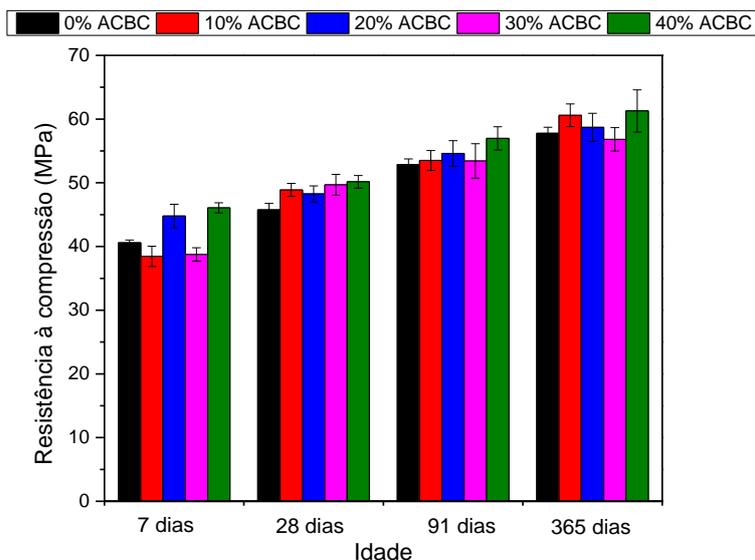
Aos 91 dias de idade, os resultados de resistência à compressão das argamassas produzidas com e sem ACBC foram similares, com exceção do traço 40% ACBC, que apresentou um aumento de 7,4 % em relação à referência.

Tabela 25- Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas aos 7, 28, 91 e 365 dias.

Traços	7 dias			28 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	Média (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
0% ACBC	40,58	0,43	1,05	45,75	1,02	2,24
10% ACBC	38,45	1,60	4,15	48,88	1,02	2,08
20% ACBC	44,79	1,84	4,11	48,25	1,26	2,61
30% ACBC	38,75	1,05	2,72	49,68	1,65	3,31
40% ACBC	46,07	0,79	1,72	50,17	0,99	1,96
Traços	91 dias			365 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
0% ACBC	52,87	0,88	1,66	57,76	0,97	1,67
10% ACBC	53,50	1,56	2,93	60,60	1,78	2,94
20% ACBC	54,60	2,02	3,69	58,70	2,21	3,76
30% ACBC	53,43	2,71	5,07	56,82	1,83	3,22
40% ACBC	56,97	1,83	3,21	61,28	3,31	5,41

Na idade de 365 dias, as argamassas 20% ACBC e 30% ACBC apresentaram resultados similares à referência (diferença de  $\pm 1,6\%$ ), por outro lado, a argamassa 40% ACBC apresentou um aumento de resistência de 6,1% em relação à referência.

Figura 49- Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28, 91 e 365 dias.



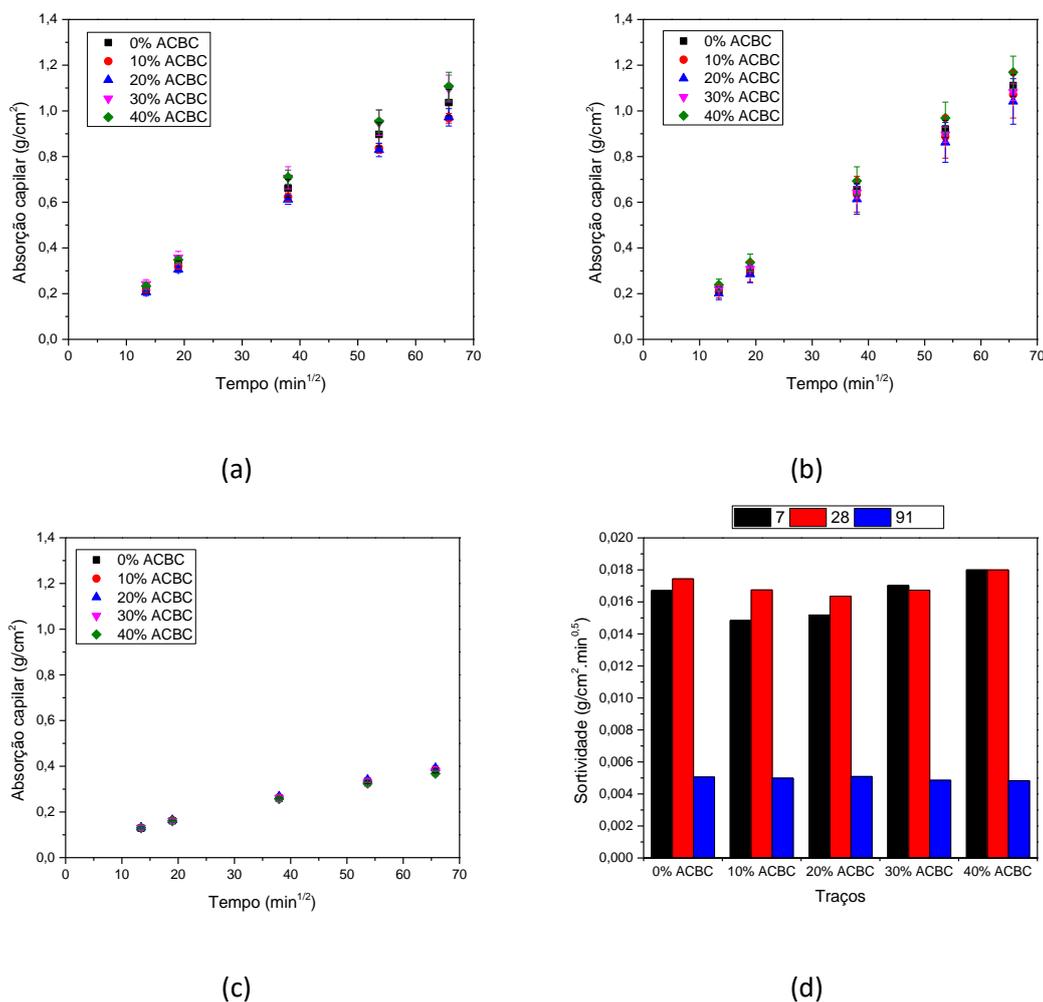
Almeida et al. (2015) produziram argamassas com teores de 0%, 30% e 50% de ACBC em substituição à areia natural, os pesquisadores concluíram que a ACBC não interfere no comportamento mecânico de argamassas.

Nesse trabalho pode-se concluir que a incorporação da ACBC contribuiu com a manutenção e/ou aumento da resistência à compressão das argamassas.

#### 4.2.3 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas nas idades de 7, 28 e 91 dias podem ser verificados na Figura 50 (a), (b) e (c). Os resultados de absorção capilar apresentaram uma boa correlação com o tempo<sup>1/2</sup> ( $R^2 \geq 0,99$ ), com isso foi possível obter a sortividade do material (Figura 50 (d)), que corresponde ao coeficiente angular da reta. Os resultados de absorção de água por capilaridade de cada amostra estão apresentados no anexo C.

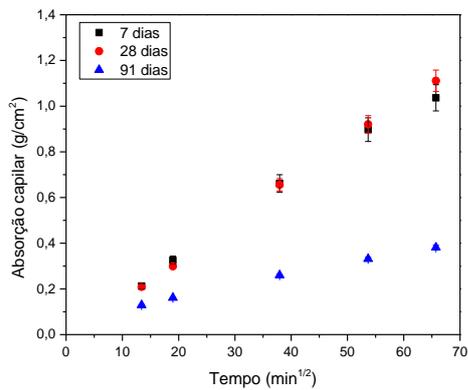
Figura 50- Absorção capilar das argamassas aos 7 dias (a), 28 dias (c) e 91 dias (c), e sortividade (d).



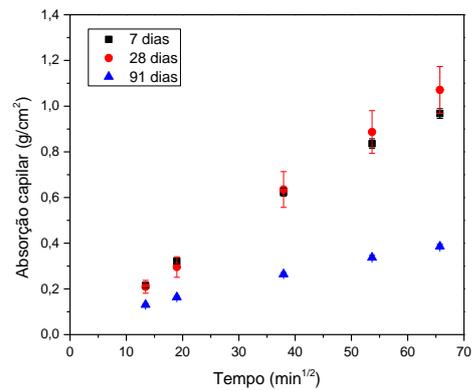
Na idade de 7 dias, os traços 10% ACBC e 20% ACBC apresentaram coeficiente de sortividade inferiores à referência, essa redução foi de 13% e 10%, respectivamente. O traço 30% ACBC apresentou um coeficiente muito próximo à referência (diferença menor de 2%). Por outro lado, a composição 40% ACBC apresentou um aumento de 8% no coeficiente de sortividade, também em relação à referência.

Aos 28 dias, os traços 10%, 20% e 30% ACBC apresentaram uma redução na sortividade de 4%, 7%, e 4%, respectivamente em relação a referência. Na idade de 91 dias, os coeficientes de sortividade de todos os traços apresentaram valores muito próximos. Na Figura 51 (a), (b), (c), (d) e (e) estão apresentados os resultados de absorção capilar de cada traço nas diferentes idades. Nas idades de 7 e 28 dias, pode-se dizer que o coeficiente de sortividade foi mantido, pois os dados estão na mesma faixa de erros. Na idade de 91 dias observou-se redução da sortividade em todos os traços.

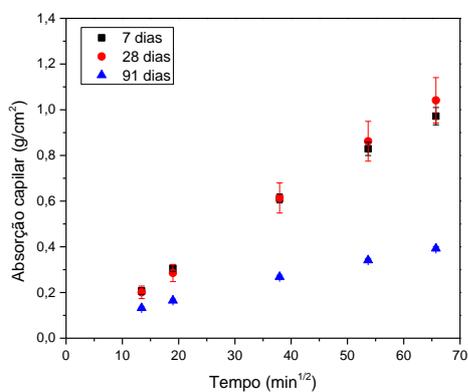
Figura 51- Absorção capilar aos 7, 28, e 91 dias das argamassas 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d), e 40% ACBC (e).



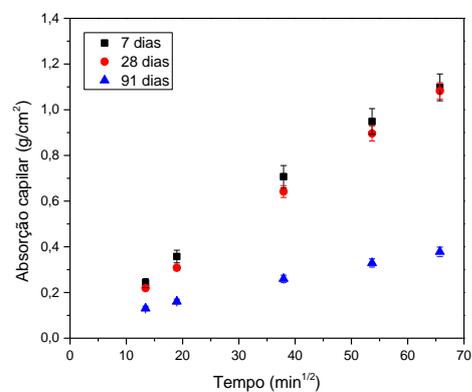
(a)



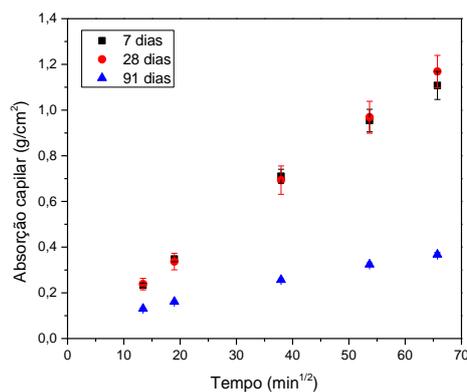
(b)



(c)



(d)



(e)

Modani & Vyawahare (2013) utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição à areia natural nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% (em volume) para a produção de argamassas. As argamassas produzidas com a cinza apresentaram um aumento no coeficiente de sortividade de 12%, 31%, 77% e 147% para os teores de

substituição de 10%, 20%, 30% e 40%, em comparação com a argamassa de referência (0% de cinza). Os pesquisadores atribuíram esse resultado às partículas de cinza mais grossas, não queimadas e semi-queimadas, as quais são mais porosas e absorvem mais água.

Ganezan et al., (2007) utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento nos teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% na produção de concretos. Os autores verificaram que na idade de 90 dias o coeficiente de sortividade no concreto produzido com 15% de cinza reduziu 69% em relação ao concreto de referência. Esse resultado pode ser explicado devido à elevada atividade pozolânica da cinza utilizada na pesquisa.

Diferente dos resultados obtidos por Modani & Vyawahare (2013), nesse trabalho a ACBC não afetou o coeficiente de sortividade das argamassas. No estudo de Modani & Vyawahare (2013), a cinza apresentou perda ao fogo 2,7 vezes superior à ACBC utilizada nesse estudo. A ACBC utilizada apresentou baixa perda ao fogo (1,7 %), esse resultado indica a baixa quantidade de matéria orgânica presente no material. No estudo de Ganesan et al., (2007), a cinza foi calcinada em temperatura controlada, resultando em um material de elevada atividade pozolânica, fator que justifica a melhora do coeficiente de sortividade dos concretos produzidos com a cinza. Conforme os resultados apresentados no capítulo anterior, o material utilizado nesse estudo é predominantemente cristalino e possui baixa reatividade pozolânica, ou seja, a utilização da ACBC não influenciou de maneira significativa na absorção capilar das argamassas.

#### **4.2.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)**

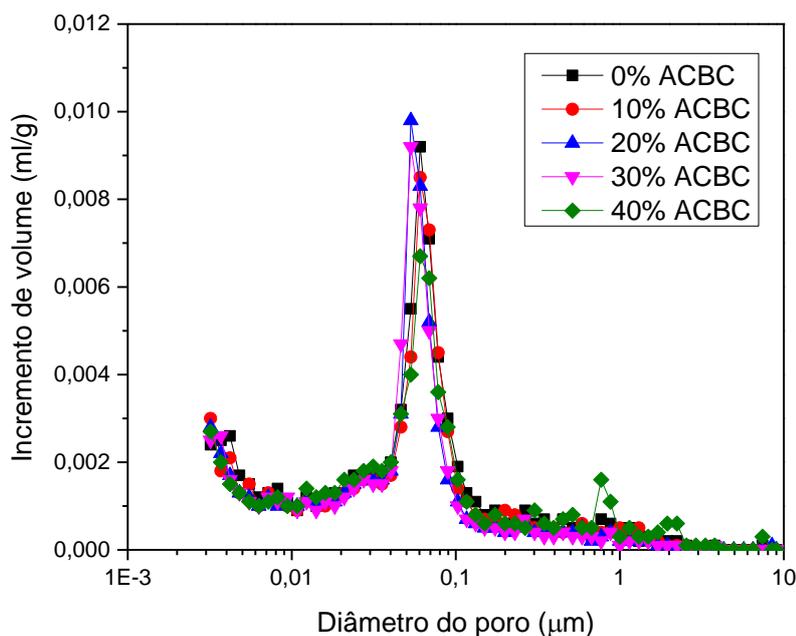
Os resultados do ensaio de PIM estão apresentados na Tabela 26. As argamassas produzidas com a ACBC apresentaram um volume total de poros inferior à amostra de argamassa de referência. Essa redução foi de 10% para a amostra 10% ACBC, 14% para as amostras 20% ACBC e 30% ACBC, e 7% para a amostra 40% ACBC. O diâmetro médio de poro é similar para todas as amostras e a porosidade das argamassas com ACBC é ligeiramente inferior à argamassa sem ACBC. Além disso, a densidade aparente das argamassas produzidas com ACBC apresentaram um pequeno aumento em relação à referência.

Tabela 26- Resultados do ensaio de PIM.

Propriedades	0%	10%	20%	30%	40%
	ACBC	ACBC	ACBC	ACBC	ACBC
Volume total intrudido (ml/g)	0,0796	0,0718	0,0688	0,0681	0,0737
Diâmetro médio de poro ( $\mu\text{m}$ )	0,0565	0,0572	0,0518	0,0511	0,0567
Densidade aparente (g/ml)	2,0976	2,1150	2,1260	2,1399	2,1065
Porosidade (%)	16,69	15,19	14,62	14,56	15,52

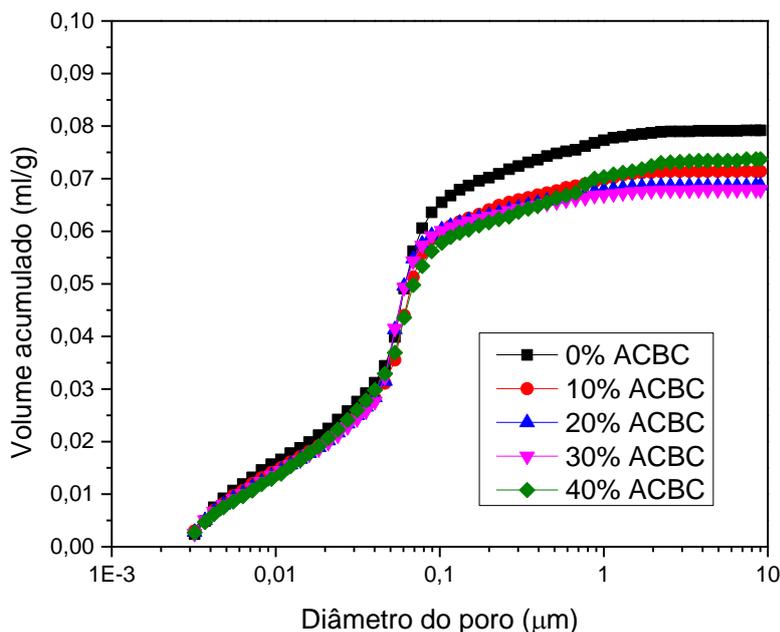
A distribuição de poros das argamassas obtidas no ensaio de PIM estão apresentadas na Figura 52. O pico de maior magnitude para as argamassas 0%, 10% e 40% de ACBC ocorre para o diâmetro de poro de 0,06  $\mu\text{m}$ . Para a argamassa 40% ACBC, o volume de mercúrio intrudido relativo ao diâmetro de poro de 0,06  $\mu\text{m}$  é 27% menor que o volume de mercúrio intrudido para o mesmo diâmetro na argamassa de referência (0% ACBC). O pico de maior magnitude para as amostras 20% ACBC e 30% ACBC ocorreram para diâmetro de poros de 0,05  $\mu\text{m}$ .

Figura 52- Distribuição de poros e incremento de volume das argamassas.



Pelas curvas incrementais não foi possível identificar diferenças significativas na distribuição de poros das diferentes composições de argamassas. Foram então plotadas as curvas acumuladas, as quais podem ser visualizadas na Figura 53. Todas as curvas apresentaram comportamento similar até o diâmetro de poros de 0,1  $\mu\text{m}$ . Após essa dimensão de diâmetro, fica evidente a maior porosidade da argamassa de referência (0% ACBC) em comparação às argamassas produzidas com a ACBC.

Figura 53- Curvas acumuladas da distribuição de poros das argamassas.



A incorporação da ACBC contribuiu principalmente com a redução dos macroporos (ou capilares longos) de diâmetros superiores a  $0,1 \mu\text{m}$ , segundo a classificação apresentada por Mindess et al. (2003). E esses poros influenciam principalmente na permeabilidade e difusividade do material cimentício (MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2003). Diante disso, realizou-se o somatório do volume de mercúrio intrudido nas amostras considerando os poros maiores e menores que  $0,1 \mu\text{m}$  (Tabela 27). Observou-se que o incremento no teor de ACBC reduziu o volume de poros maiores que  $0,1 \mu\text{m}$  (exceto para a amostra 40% ACBC), e o volume de poros menores que  $0,1 \mu\text{m}$ , em comparação com a amostra 0% ACBC.

Tabela 27 – Somatório do volume de mercúrio intrudido correspondente aos poros maiores e menores que  $0,1 \mu\text{m}$ 

$\Sigma$ volume de mercúrio (ml/g)	0% ACBC	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Poros $< 0,1 \mu\text{m}$	0,0636	0,0585	0,0592	0,0591	0,0562
Poros $> 0,1 \mu\text{m}$	0,0156	0,0129	0,0095	0,0088	0,0175

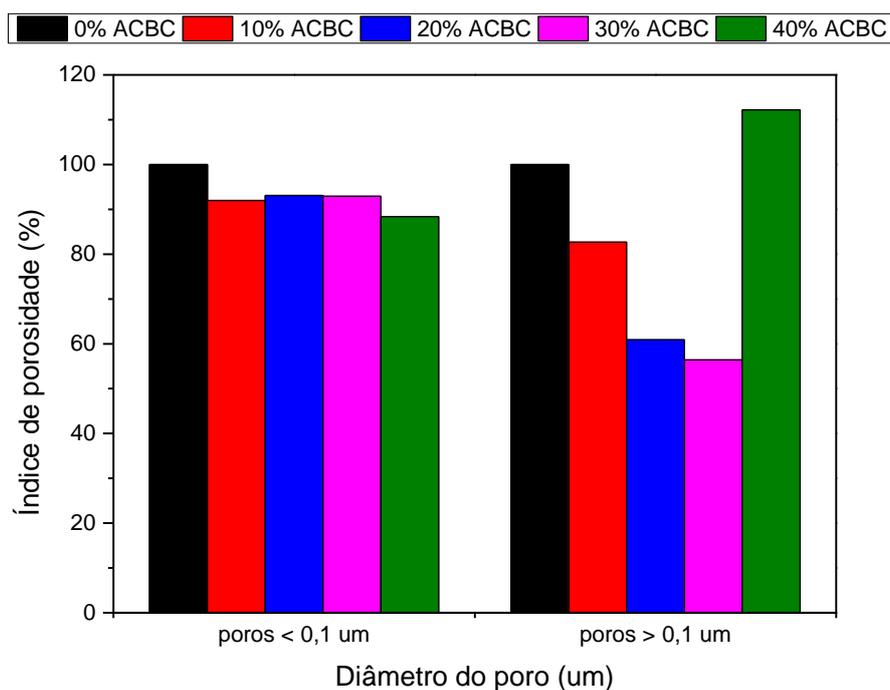
Para avaliar a influência da incorporação da ACBC nos poros maiores e menores que  $0,1 \mu\text{m}$ , calculou-se o Índice de porosidade (Equação 28) de cada composição em relação ao volume de poros da argamassa de referência (0% ACBC).

$$\text{Índice de Porosidade} = \frac{\text{Volume de poros}_n}{\text{Volume de poros}_{0\%ACBC}} \times 100$$

Equação 28

Os resultados dos Índices de porosidade estão apresentados na Figura 55. Para os poros menores que 0,1  $\mu\text{m}$ , a incorporação da ACBC provocou a redução média de 8% no volume de poros, em comparação com a argamassa de referência (0% ACBC). Considerando os poros maiores que 0,1  $\mu\text{m}$ , o incremento no teor de ACBC contribuiu com a redução de 17%, 39%, e 44%, no volume de poros para as composições 10%ACBC, 20%ACBC, e 30%ACBC, respectivamente, e aumento de 12% para a composição 40% ACBC, em comparação com a argamassa de referência. O aumento na porosidade na amostra 40% ACBC pode ser justificado pela dificuldade de dispersão das partículas.

Figura 54- Índice de porosidade (poros maiores e menores que 0,1  $\mu\text{m}$ ).

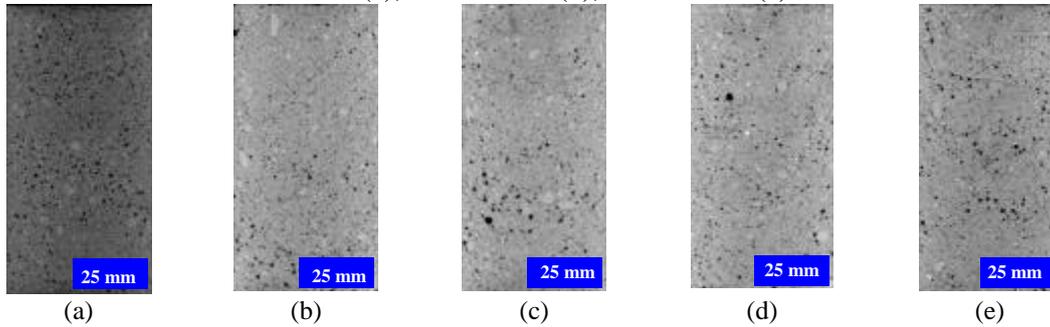


#### 4.2.5 Tomografia computadorizada de raios-X

As diferenças de densidade entre a amostra de referência (0% ACBC) e as amostras produzidas com ACBC também foram identificadas pela tomografia. Pode-se verificar na Figura 55 que as amostras produzidas com a ACBC (Figura 55 (b), (c), (d), e (e)) apresentam coloração mais clara de cinza do que a argamassa referência (Figura 55 (a)). Na configuração do software adotada para analisar as amostras, a coloração mais

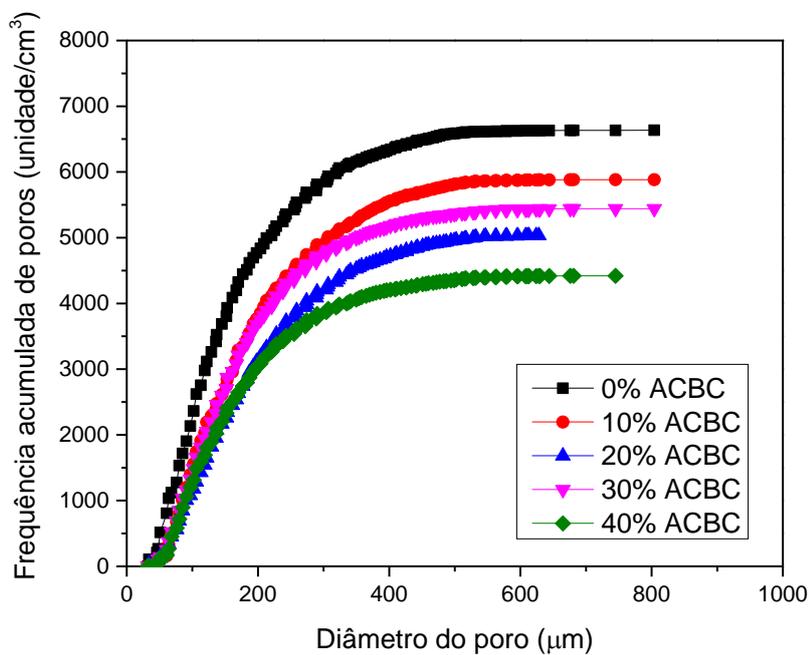
clara indica a maior densidade da amostra. Desta forma, é possível afirmar que as amostras produzidas com a ACBC são mais densas que a amostra de referência.

Figura 55- Tomografia da região central das argamassas: 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d), 40% ACBC (e).



Na Figura 56 pode-se verificar a frequência acumulada de diâmetros de poros obtidos no ensaio de tomografia. Por meio da tomografia foi possível identificar os poros maiores que  $30\ \mu\text{m}$ . As argamassas produzidas com 10%, 20%, 30% e 40% de ACBC apresentaram uma redução de frequência total de poros de 11%, 24%, 18% e 33%, respectivamente, quando comparados com a amostra de referência (0% ACBC).

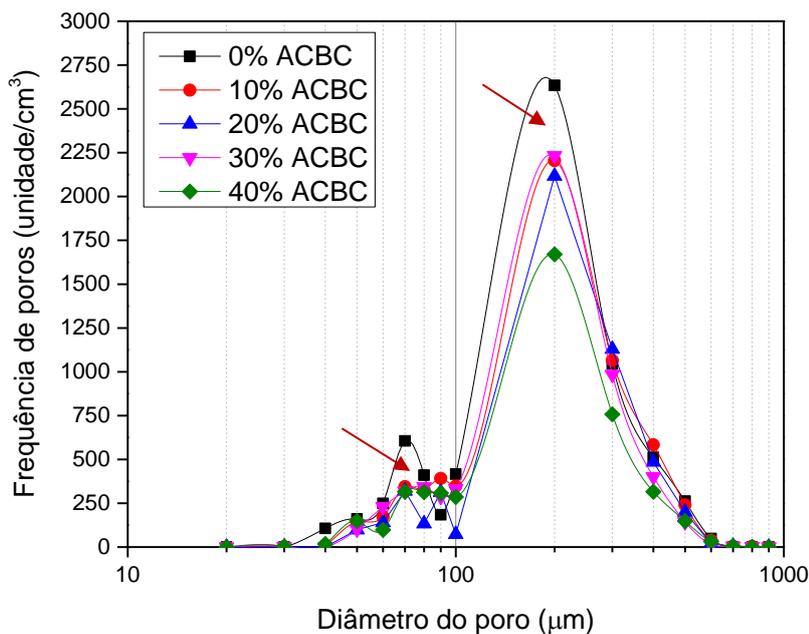
Figura 56- Frequência acumulada de diâmetros de poros das argamassas.



O gráfico da Figura 57 foi gerado pela somatória da frequência de poros detectada em cada faixa de porosidade. Foi possível identificar uma redução na frequência de poros para as argamassas produzidas com a ACBC quando comparadas com a

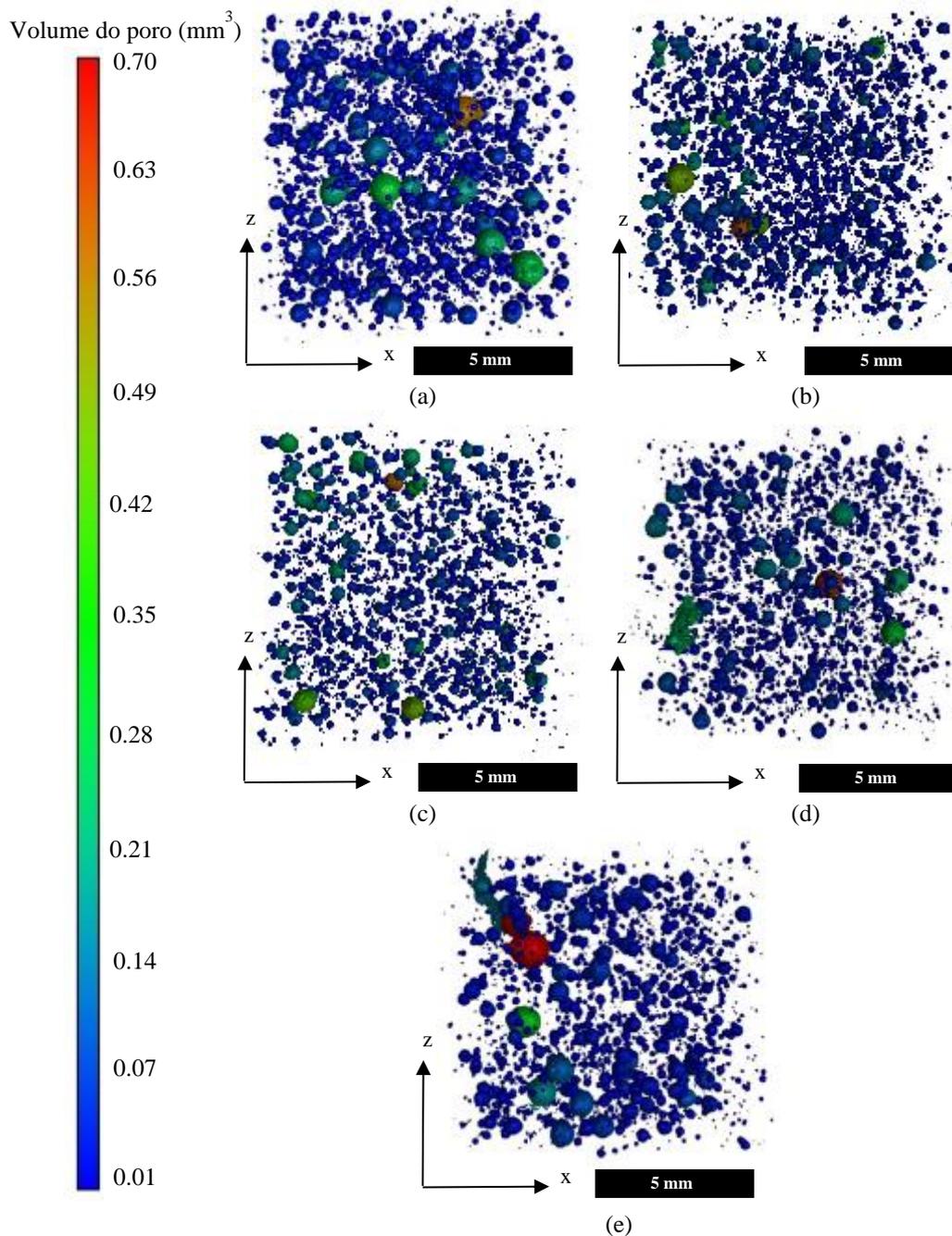
argamassa de referência nas faixas de poros de 60–80  $\mu\text{m}$  e 100–300  $\mu\text{m}$  (regiões indicadas pelas setas na Figura 57). Para a faixa de 60–80  $\mu\text{m}$  a redução da frequência de poros foi de 33%, 53%, 30% e 43%, e para a faixa de 100–300  $\mu\text{m}$  a redução foi de 12%, 19%, 13% e 34% para as argamassas 10% ACBC, 20% ACBC, 30% ACBC e 40% ACBC, respectivamente.

Figura 57- Distribuição de poros das argamassas.



A menor quantidade de poros das amostras produzidas com a ACBC quando comparadas com a amostra de referência também pode ser identificada visualmente na Figura 58. Entre as argamassas produzidas com a ACBC, verificou-se que a amostra 40% ACBC (Figura 58 (e)) apresenta uma maior quantidade de poros grandes quando comparada com as demais amostras (Figura 58 (b), (c) e (d)).

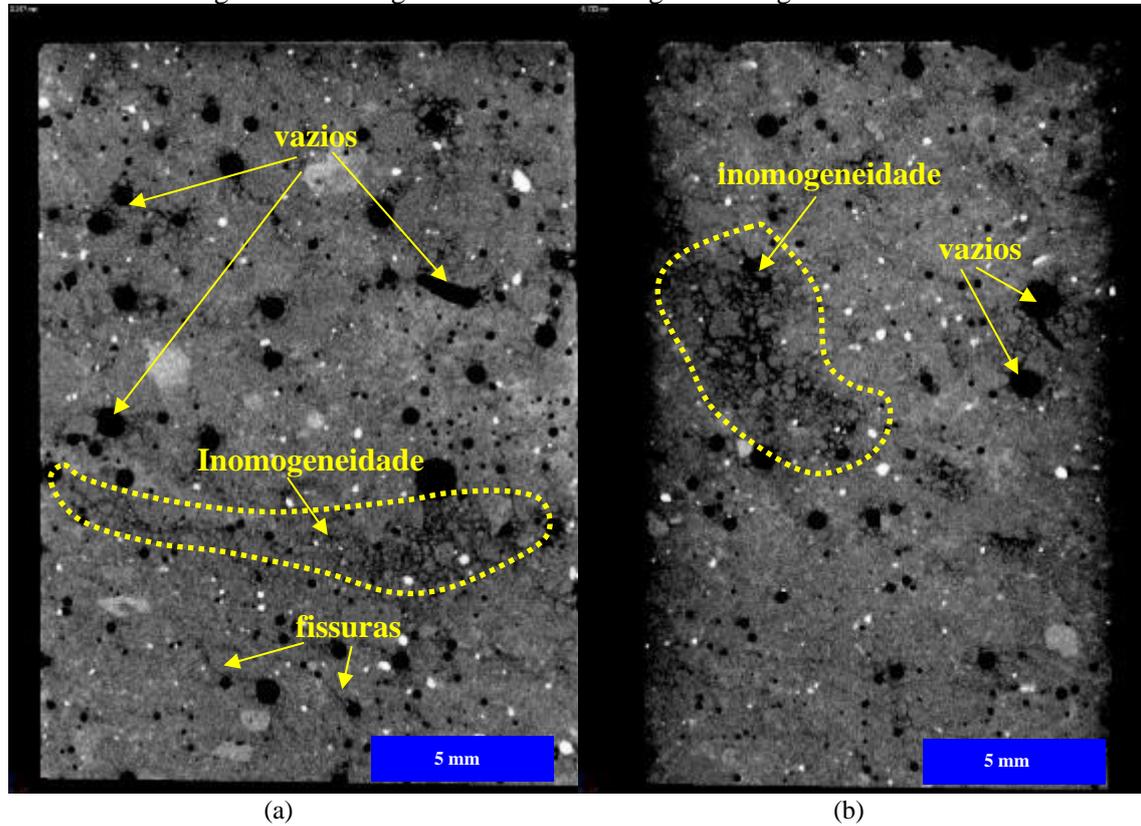
Figura 58- Porosidade das argamassas: 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d) e 40% ACBC (e).

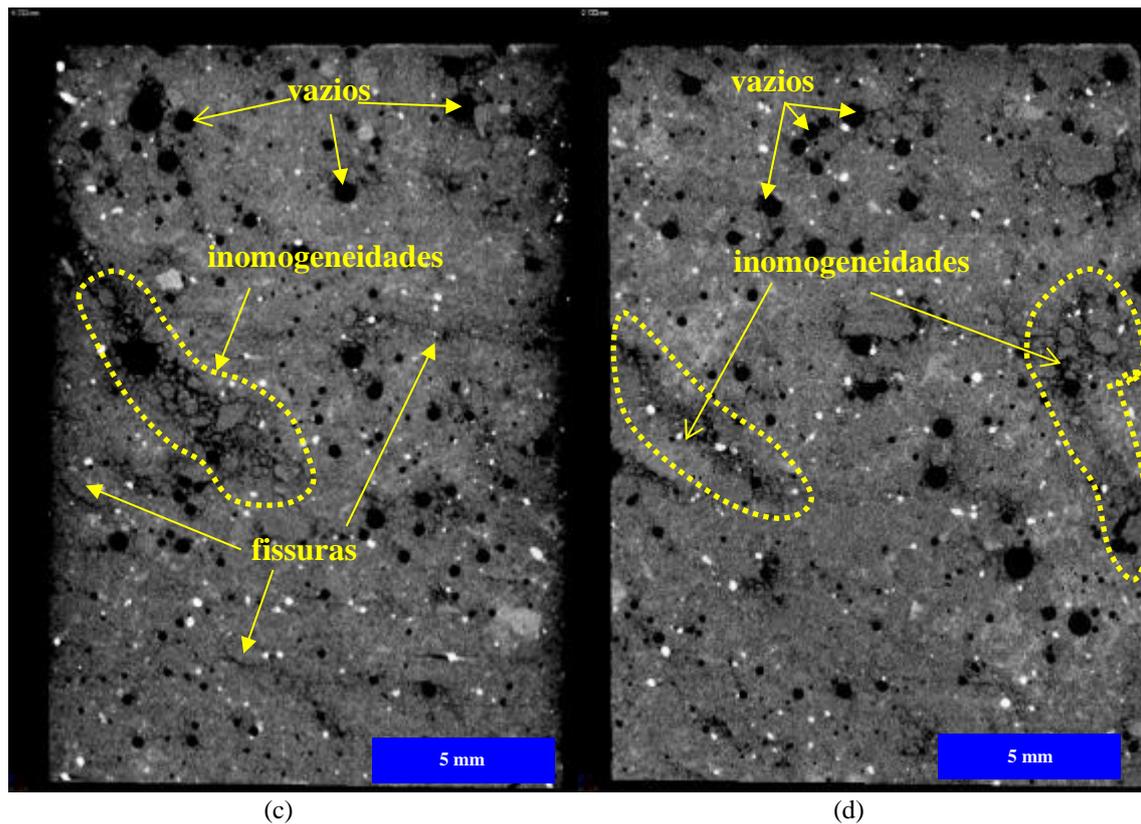


Apesar da argamassa produzida com 40% de ACBC ter apresentado propriedades físicas e resistência mecânica superiores às demais argamassas, pelo ensaio de tomografia foi possível identificar anomalias generalizadas na mesma. As imagens apresentadas na Figura 59 (a - d) foram obtidas de diferentes regiões do corpo de prova de argamassa 40% ACBC. Foi possível observar diversos vazios, fissuras e inhomogeneidades. O elevado teor de partículas finas existentes na argamassa 40% ACBC levou a uma redução significativa no índice de consistência (33 mm em relação a

argamassa de referência). Devido a isso, a dispersão das partículas e a compactação da argamassa foi prejudicada, causando defeitos na matriz cimentícia. Vale salientar que a utilização de aditivo superplastificante poderá solucionar o problema de dispersão das partículas, viabilizando assim a incorporação de 40% de ACBC.

Figura 59- Tomografia de diferentes regiões da argamassa 40% ACBC.

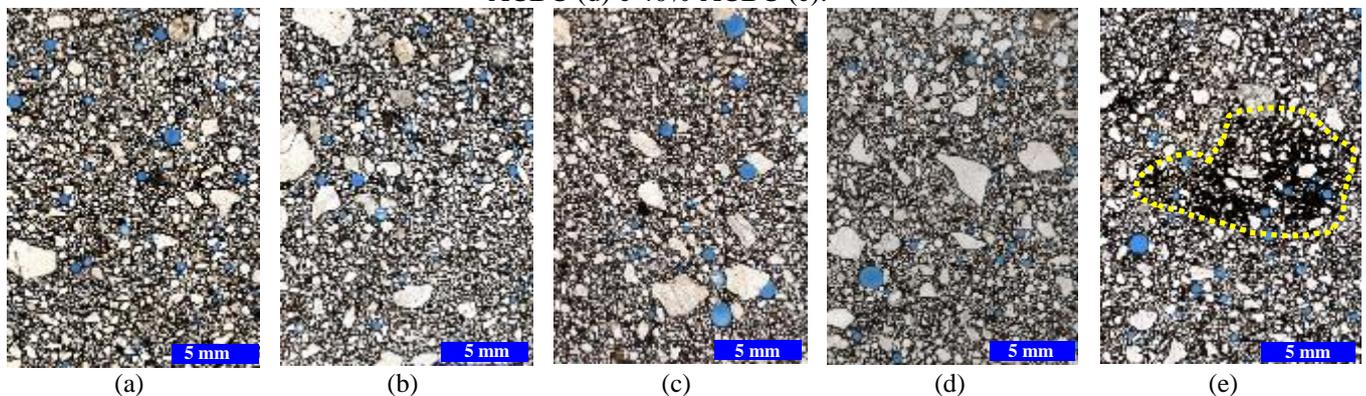




#### 4.2.6 Análise petrográfica

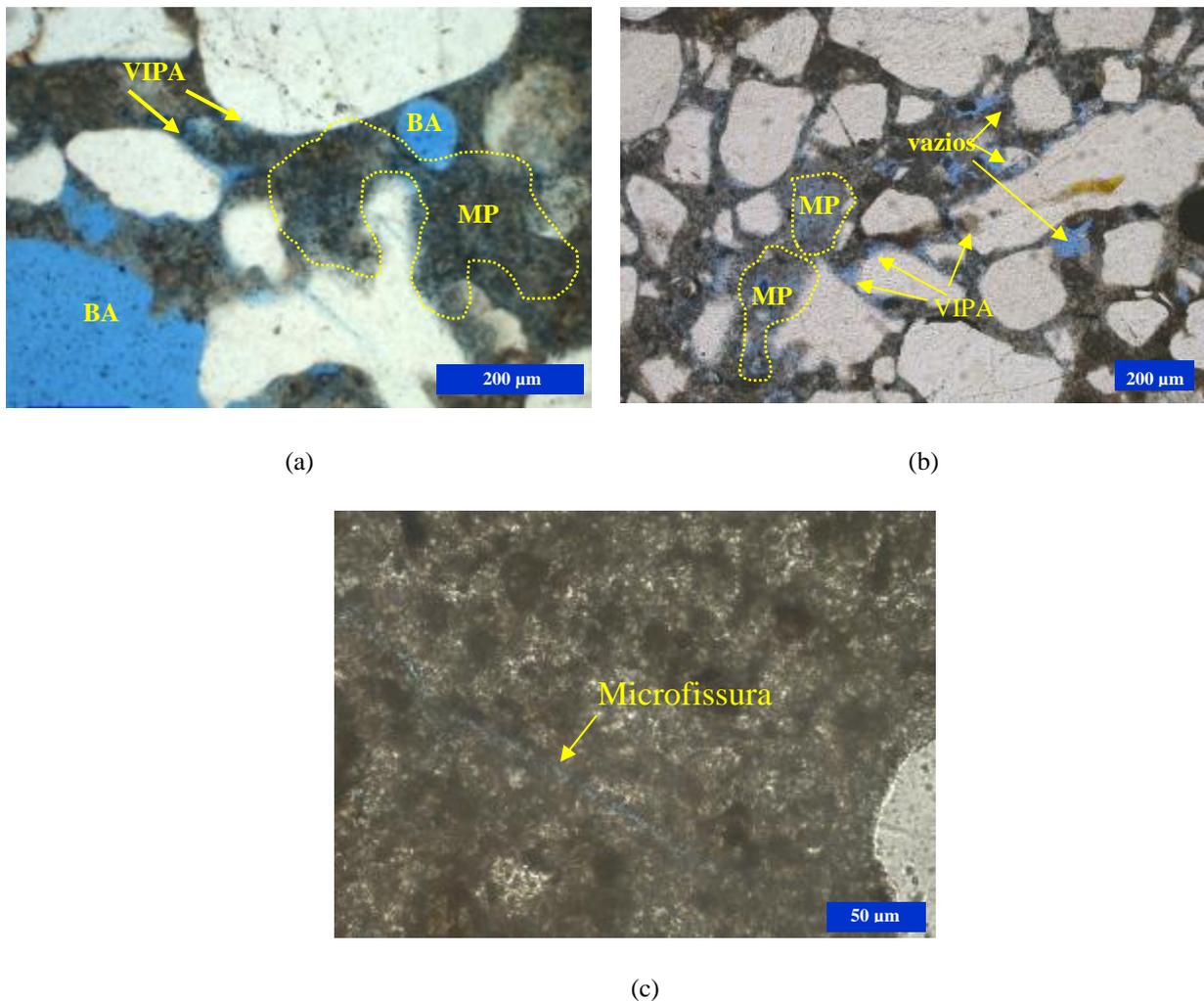
Por meio das análises das lâminas petrográficas das argamassas verificou-se que todas as amostras apresentaram uma distribuição homogênea da pasta (Figura 60 (a), (b), (c) e (d)), com exceção da amostra 40% ACBC (Figura 60 (e)). Pode-se observar na amostra 40% ACBC (Figura 60 (e)) uma região de acúmulo de pasta (identificada pela linha tracejada em amarelo), essa região indica problemas de dispersão da ACBC na argamassa.

Figura 60- Micrografias das argamassas: 0% ACBC (a), 10% ACBC (b), 20% ACBC (c), 30% ACBC (d) e 40% ACBC (e).



Em todas as amostras foram identificadas bolhas de ar (BA) de dimensões variadas (de 50 - 1000  $\mu\text{m}$ ); regiões de microporosidade na pasta (MP) principalmente nas proximidades dos agregados e associadas as bolhas de ar; também foram identificados vazios na interface agregado-pasta (VIPA) próximo as regiões de microporosidade (Figura 61 (a) e (b)). Na região de acúmulo de pasta na amostra 40% ACBC foram identificadas microfissuras com espessura de 5  $\mu\text{m}$  (Figura 61 (c)). O alto teor de partículas finas na amostra 40% ACBC pode ter contribuído com a retração do CSH-gel (LANGE; MÖRTEL; RUDERT, 1997) causando microfissuração na pasta.

Figura 61- Microscopias das argamassas: 0% ACBC (a) e 40% ACBC (b e c).

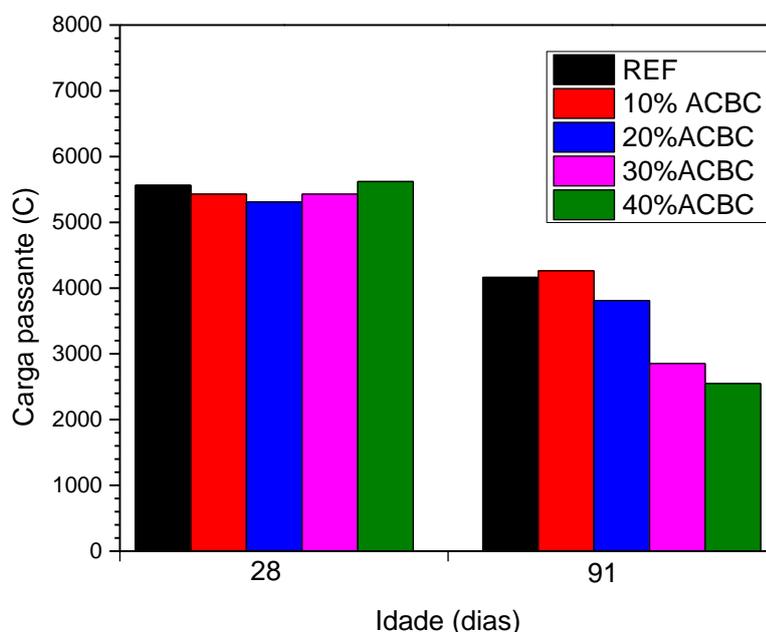


O uso conjunto das técnicas de tomografia e petrografia foi fundamental para identificar as anomalias da argamassa 40% ACBC. Vale salientar que, diferente da técnica de petrografia, a tomografia é uma técnica não destrutiva que permite a investigação do volume total da amostra.

#### 4.2.7 Penetrabilidade de cloretos

Os resultados do ensaio de penetrabilidade de cloretos das argamassas realizados nas idades de 28 e 91 dias estão apresentados na Figura 63. Na idade de 28 dias, as composições REF, 10% ACBC e 20% ACBC atingiram temperatura superior a 90°C após 180 minutos de monitoramento, e as composições 30% ACBC e 40% ACBC, após 240 minutos. Na idade de 91 dias, apenas a amostra REF atingiu temperatura superior a 90°C após 240 minutos de ensaio. Devido a isso, o ensaio foi interrompido antes do tempo previsto de 6 horas para as amostras que atingiram a temperatura superior a 90°C. Dessa forma, para poder comparar a carga passante entre os traços e entre as diferentes idades das argamassas, foram considerados os resultados obtidos até 150 minutos de ensaio.

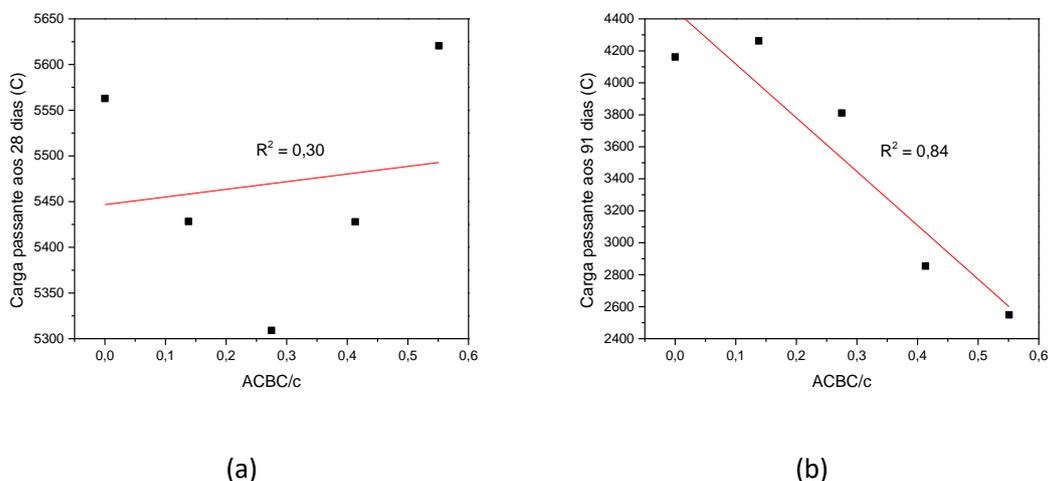
Figura 62- Carga elétrica passante até 150 minutos de ensaio.



Na idade de 28 dias não houve diferença significativa entre a carga passante dos diferentes traços. Também foi possível verificar que não há correlação entre a carga passante e a relação ACBC/cimento (Figura 63 (a)). Na idade de 91 dias, pode-se observar que o aumento no teor de ACBC provocou redução na carga passante, com exceção da amostra 10% ACBC. A redução da carga passante foi de 8%, 31% e 39% para os traços 20% ACBC, 30% ACBC e 40% ACBC, respectivamente. Além disso, os resultados de carga passante e relação ACBC/cimento apresentaram correlação de 84% (Figura 63 (a)). Pode-se concluir que, para a idade de 91 dias, o incremento no teor de ACBC levou a

uma redução da carga passante, e, conseqüentemente possibilitou o aumento da resistência à penetração dos íons cloreto.

Figura 63- Correlação carga elétrica passante versus índice ACBC/c das argamassas.



Rukzon & Chindaprasirt (2012) utilizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como pozolana em substituição parcial do cimento nos teores de 0% (referência), 10%, 20% e 30% para a produção de concretos de alta resistência. Os concretos produzidos com teores de 10%, 20% e 30% de ACBC apresentaram uma redução de 31%, 45% e 70%, respectivamente, na carga passante em comparação ao concreto de referência. A incorporação da cinza reduz consideravelmente a penetração de cloretos.

Concretos produzidos com teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento apresentaram uma redução na carga passante de 36%, 44%, 52%, 56%, 60% e 20%, respectivamente em relação ao concreto de referência (sem cinza) (AMIN, 2011). Os pesquisadores atribuíram esse efeito ao refinamento da estrutura porosa das matrizes devido a atividade pozolânica e efeito fíler da cinza.

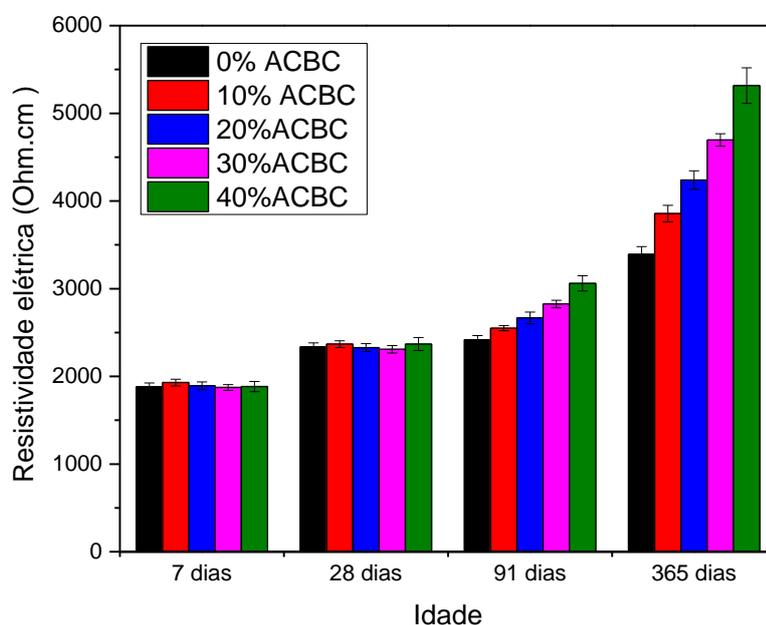
A redução da carga passante pode estar associada à diversos fatores, tais como: redução do volume e tortuosidade dos poros, alteração na condutividade elétrica da solução existente nos poros e também a redução da difusividade inerente ao C-S-H formado pela reação pozolânica (BENTZ et al., 2000).

#### 4.2.8 Resistividade Elétrica

Os resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica das argamassas nas idades de 7, 28, 91 e 365 dias estão apresentados na Figura 64. Nas idades de 7 e 28 dias não foram observadas diferenças nos valores obtidos de resistividade elétrica entre os

traços. Aos 91 e 365 dias, observou-se que o aumento no teor de ACBC em substituição à areia provocou um aumento significativo na resistividade elétrica. Aos 91 dias esse aumento em relação a argamassa de referência foi de 6%, 10%, 17% e 27% para os traços 10% ACBC, 20%ACBC, 30%ACBC e 40%ACBC, respectivamente, e de 14%, 25%, 38% e 57% aos 365 dias. Desse modo, foi possível identificar que as diferenças são significativas para as idades mais avançadas, conforme pode ser visualizado na Figura 64. Os resultados de resistividade elétrica de cada amostra estão apresentados no anexo D.

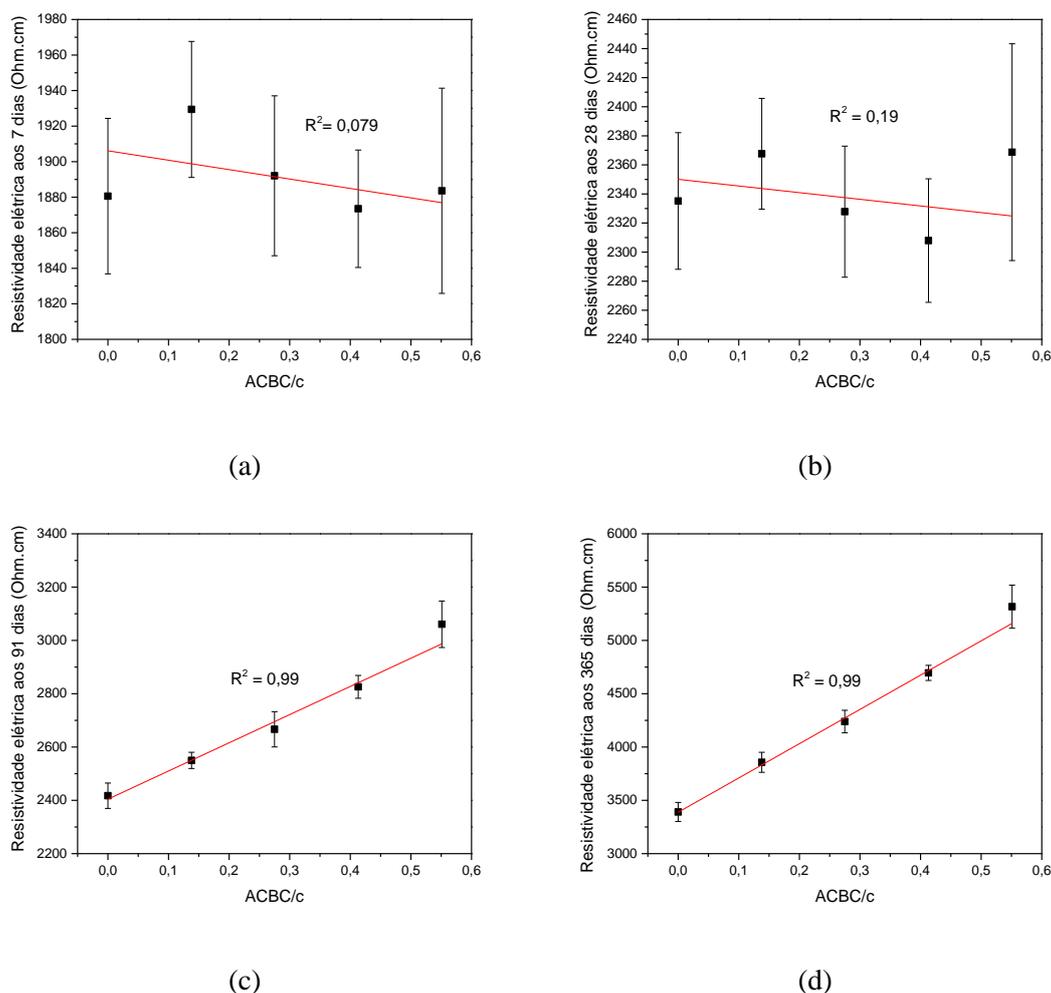
Figura 64- Resistividade elétrica das argamassas.



A resistividade elétrica indica a resistência do material à passagem de corrente elétrica, quando maior a resistividade, maior a dificuldade de movimentação iônica no interior do material.

Pode-se verificar na Figura 65 a correlação existente entre a relação ACBC/cimento e os resultados de resistividade elétrica aos 7, 28, 91 e 365 dias. Nas idades de 7 e 28 dias não houve correlação, por outro lado, nas idades de 91 e 365 dias a correlação foi de 99%.

Figura 65- Correlação índice ACBC/c versus resistividade elétrica das argamassas: 7 dias (a), 28 dias (b), 91 dias (c), 365 dias (d).



Por meio da aplicação da técnica de resistividade elétrica também foi possível monitorar a evolução da hidratação da matriz cimentícia. A resistividade elétrica das matrizes aumentou com o passar do tempo (Figura 64). A medida que ocorreu a hidratação, a porosidade foi reduzida, consequentemente a disponibilidade de água livre também reduziu. Esses fatores contribuíram para o aumento da resistividade elétrica. Para os traços produzidos com a ACBC ficou evidenciada a ocorrência da reação pozolânica, pois nas idades iniciais não houveram diferenças significativas entre os traços com e sem ACBC, já nas idades de 91 e 365 dias, o aumento no teor de ACBC levou ao aumento da resistividade elétrica.

O aumento na resistividade elétrica para as argamassas produzidas com a ACBC pode estar associado à redução da porosidade interconectada e/ou aumento da tortuosidade dos “caminhos”, e também à composição química da solução de água de poros.

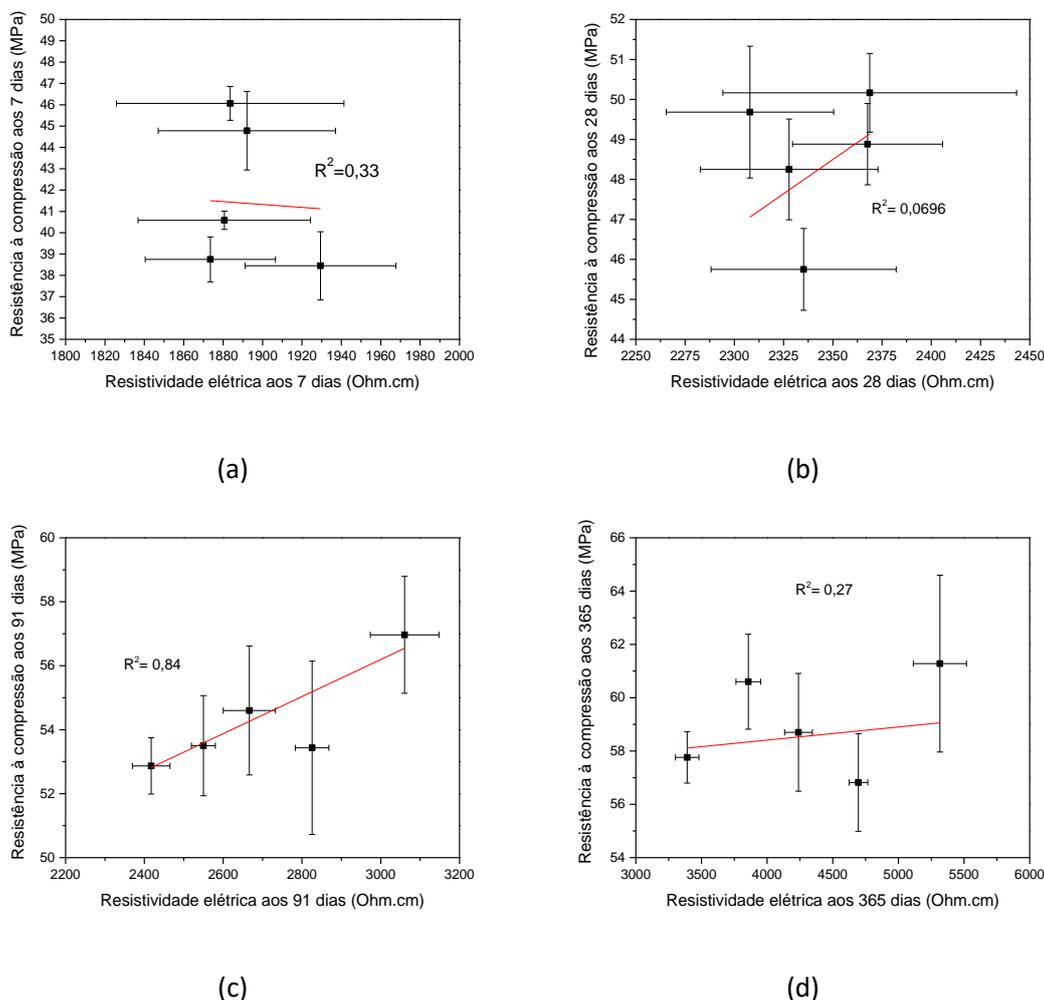
No estudo realizado por Joshaghani & Moeini (2017), o incremento no teor de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento levou a um aumento na resistividade elétrica das argamassas. Na idade de 91 dias as argamassas produzidas com 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de cinza apresentaram um incremento na resistividade elétrica de 34%, 76%, 114%, 159% e 172%, respectivamente.

Os resultados de resistividade elétrica foram correlacionados com os resultados de resistência à compressão, absorção capilar, porosidade e penetrabilidade de cloretos.

#### **4.2.8.1 Resistividade elétrica e resistência à compressão**

Os resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica e resistência à compressão aos 7, 28, 91 e 365 foram plotados em gráficos (Figura 66 (a), (b), (c), (d)). Nas idades de 7 e 28 dias, os pontos apresentaram grande dispersão e não foi verificada nenhuma tendência. Já nas idades de 91 e 365 dias observou-se um aumento da resistividade elétrica. Aos 91 dias o coeficiente de correlação foi de 84% (Figura 66 (d)), mas ainda assim não foi possível comprovar a existência da correlação entre as propriedades, uma vez que houve uma dispersão nos resultados de resistência à compressão.

Figura 66- Relação entre resistividade elétrica e resistência à compressão das argamassas aos 7 (a), 28 (b), 91 (c) e 356 (d) dias.



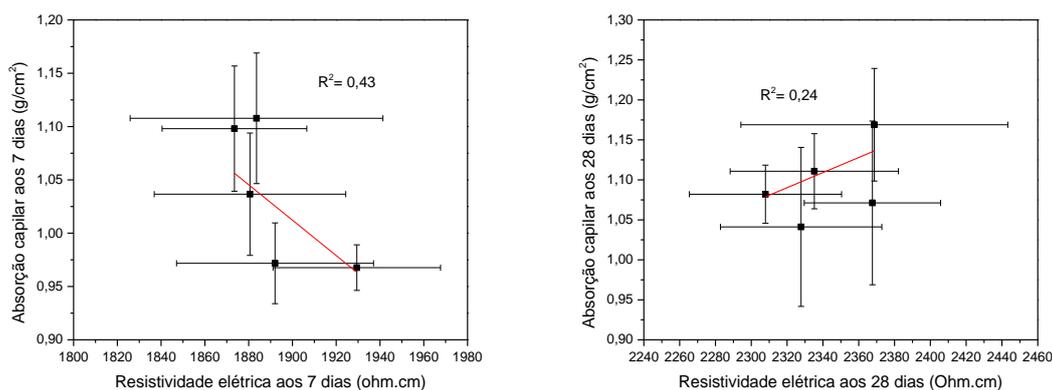
Por meio desses resultados infere-se que os produtos formados pela reação pozolânica da cinza não influenciaram de maneira significativa na resistência mecânica da matriz. De acordo com Feldman (1985), os compostos hidratados formados pela reação pozolânica são mais eficientes para colmatar poros do que para aumentar resistência mecânica. Isso ocorre devido a menor densidade dos hidratos formados pela reação pozolânica quando comparados com os produtos originários da reação do cimento.

#### 4.2.8.2 Resistividade elétrica e absorção capilar.

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica também foram comparados com a absorção capilar das argamassas para as idades de 7, 28, e 91 dias (Figura 67 (a), (b), (c)). Não foram observadas correlações entre a absorção capilar e a resistividade elétrica. Embora a resistividade elétrica das argamassas tenha aumentado na idade de 91 dias, não foram observadas alterações significativas na absorção capilar. No estudo desenvolvido

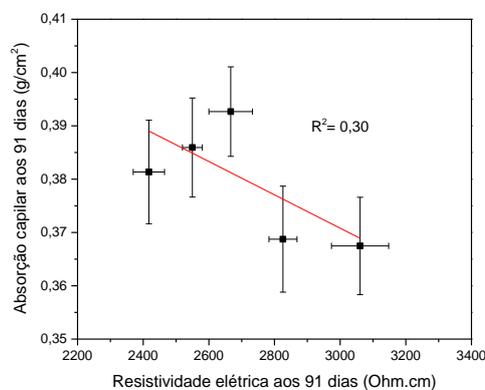
por Courard et al. (2003) a incorporação do metacaulim em argamassas também não afetou a absorção capilar. Por outro lado, no estudo desenvolvido por Van Den Heede et al. (2010), concretos produzidos com cinza apresentaram maior absorção capilar que o concreto de referência (sem cinza). Por fim, Gonen & Yazizioglu (2007) salientam que não existe um consenso na literatura a respeito do efeito da adição de cinzas na absorção de água por capilaridade.

Figura 67- Relação entre resistividade elétrica e absorção capilar das argamassas aos 7 (a), 28 (b), 91 (c) e 356 (d) dias.



(a)

(b)



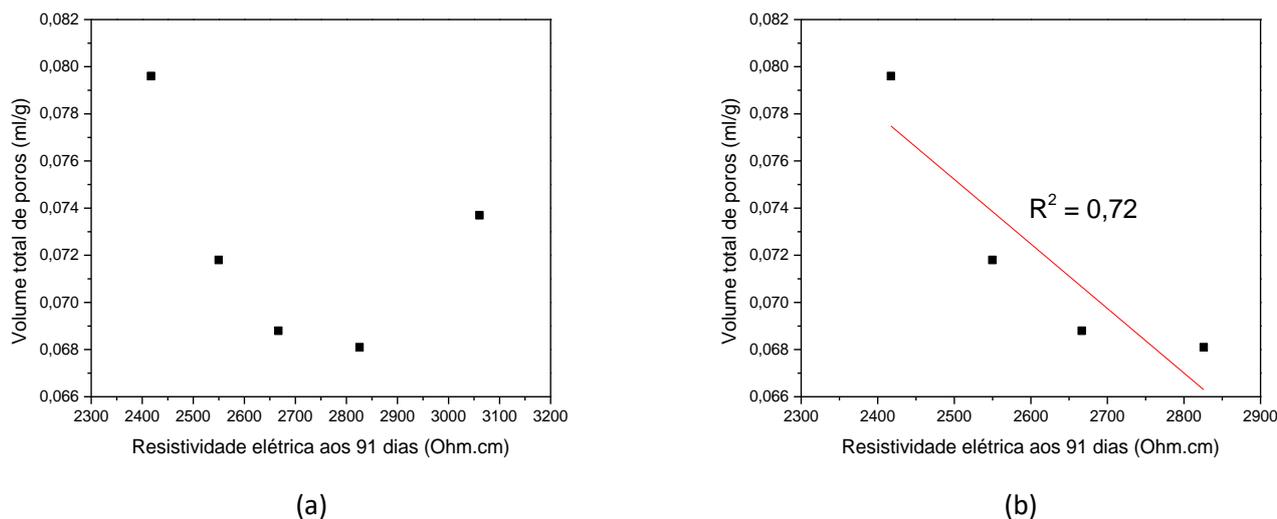
(c)

#### 4.2.8.3 Resistividade elétrica e volume de poros

Na Figura 68 está apresentada a relação entre os valores obtidos no ensaio de resistividade elétrica e os valores do volume total de poros obtidos pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, ambos para argamassas na idade de 91 dias. Pode-se observar que com o incremento no teor de ACBC, o volume total de poros reduziu e a resistividade elétrica aumentou, com exceção do traço 40% ACBC (Figura 68 (a)). Os resultados apresentaram uma correlação de 72% (desconsiderando a argamassa 40%

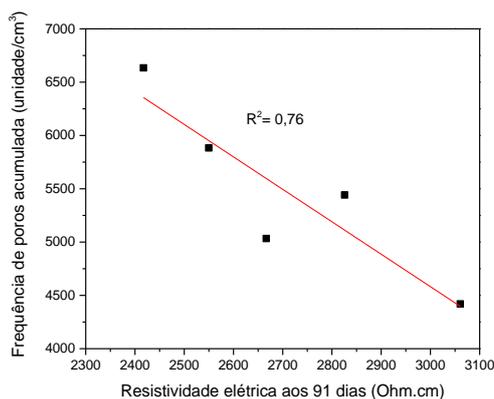
ACBC) (Figura 68 (b)). O melhor resultado ocorreu para o teor de 30% de ACBC, no qual a resistividade elétrica da mesma foi 17% maior que a resistividade elétrica da argamassa de referência e o volume total de poros da argamassa de referência foi 17% maior que o volume total de poros da argamassa 30% ACBC.

Figura 68- Relação entre resistividade elétrica e volume de poros das argamassas aos 91 dias: resultados de todas as composições (a), resultados excluindo a composição 40% ACBC (b).



Os resultados obtidos no ensaio de tomografia apresentaram uma correlação de 76% com os resultados de resistividade elétrica (Figura 69).

Figura 69- Relação entre resistividade elétrica e frequência de poros das argamassas aos 91 dias

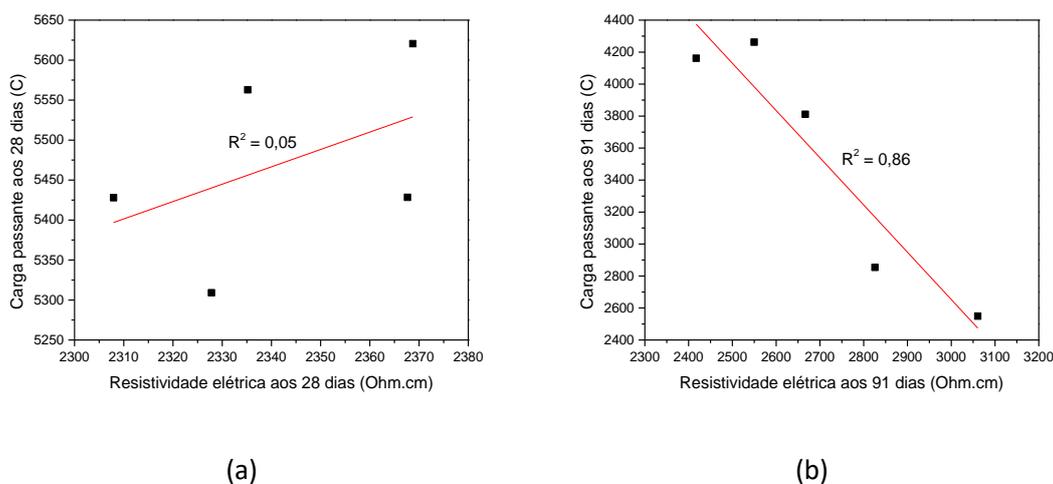


Por meio desses resultados ficou evidente que o incremento do teor de ACBC levou a uma redução da porosidade, a qual influenciou diretamente no aumento da resistividade elétrica das argamassas.

#### 4.2.8.4 Resistividade elétrica e penetrabilidade de cloretos

Na Figura 70 está apresentada a relação entre os resultados de resistividade elétrica e carga passante das argamassas nas idades de 28 e 91 dias. Na idade de 28 dias não houve correlação entre os resultados apresentados (Figura 70 (a)). Por outro lado, na idade de 91 dias os resultados apresentaram uma correlação de 86% (Figura 70 (b)). Esses resultados mostram que a resistividade elétrica é inversamente proporcional a carga passante. Fica evidente que na idade de 91 dias ocorreram alterações significativas na microestrutura das argamassas produzidas com a ACBC, e tais alterações provocaram a redução da carga passante e o aumento da resistividade elétrica. A deposição de partículas de C-S-H proveniente da reação pozolânica da cinza pode ter obstruído e/ou colmatado poros provocando um aumento na tortuosidade dos “caminhos” (NARMLUK; NAWA, 2011), dificultando assim a mobilidade dos íons no interior das argamassas.

Figura 70- Correlação carga elétrica passante versus resistividade elétrica das argamassas: 28 dias (a), 91 dias (b).



#### 4.2.9 Condutividade elétrica e pH das argamassas

Os resultados de condutividade elétrica e pH podem ser verificados na Tabela 28. Todas as argamassas apresentaram resultados de condutividade elétrica e pH similares, ou seja, a substituição da areia fina pela ACBC não alterou essas propriedades.

Diante desse resultado, pode-se inferir que o aumento na resistividade elétrica e também a redução da carga elétrica passante das argamassas produzidas com a ACBC estão relacionados com a colmatagem dos poros e/ou aumento na tortuosidade dos “caminhos” condutivos no interior da matriz, uma vez que as condutividades iônicas das diferentes soluções não alteraram com a incorporação da ACBC.

Tabela 28- Resultados de condutividade elétrica e pH das soluções produzidas com as argamassas após 365 dias de cura.

Traço	Condutividade elétrica mS/cm	pH
REF	6,2	12,4
10% ACBC	6,2	12,4
20% ACBC	6,4	12,4
30% ACBC	6,3	12,4
40% ACBC	6,4	12,4

#### 4.2.10 Previsão da permeabilidade das argamassas

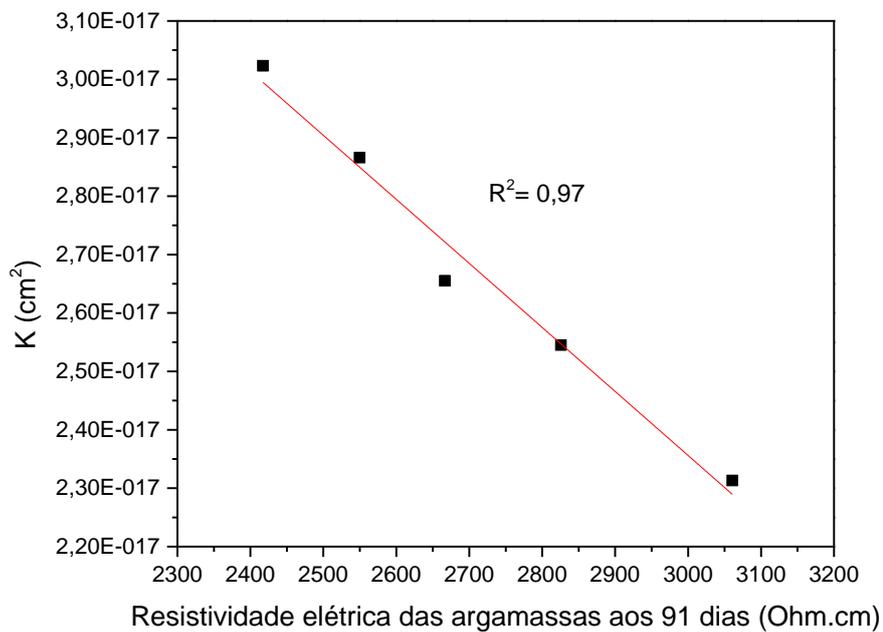
Com os dados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica, porosimetria por intrusão de mercúrio e condutividade elétrica das soluções de água de poros foi possível prever a permeabilidade (k) das argamassas por meio da Equação 7 proposta por Katz e Thompson (1986). Os dados utilizados para o cálculo, bem como os resultados da previsão da permeabilidade (k) das argamassas podem ser verificados na Tabela 29.

Tabela 29- Dados utilizados para a previsão da permeabilidade das argamassas.

Composição	Diâmetro crítico (cm)	Condutividade	Condutividade	K obtido (cm <sup>2</sup> )
		elétrica da solução de água de poros (1/Ohm.cm)	elétrica da argamassa saturada (1/Ohm.cm)	
0% ACBC	$3,2 \times 10^{-7}$	0,0062	$4,14 \times 10^{-4}$	$3,02 \times 10^{-17}$
10% ACBC	$3,2 \times 10^{-7}$	0,0062	$3,92 \times 10^{-4}$	$2,87 \times 10^{-17}$
20% ACBC	$3,2 \times 10^{-7}$	0,0064	$3,75 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-17}$
30% ACBC	$3,2 \times 10^{-7}$	0,0063	$3,54 \times 10^{-4}$	$2,55 \times 10^{-17}$
40% ACBC	$3,2 \times 10^{-7}$	0,0064	$3,27 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-17}$

O incremento no teor de ACBC levou a redução da permeabilidade de 5,2%, 12,2%, 15,8%, e 23,5% para os traços 10% ACBC, 20% ACBC, 30% ACBC e 40% ACBC, respectivamente, em comparação com a referência (0% ACBC). Os valores obtidos apresentaram uma correlação de 97% com os resultados de resistividade elétrica (Figura 71).

Figura 71- Correlação resistividade elétrica e permeabilidade das argamassas.



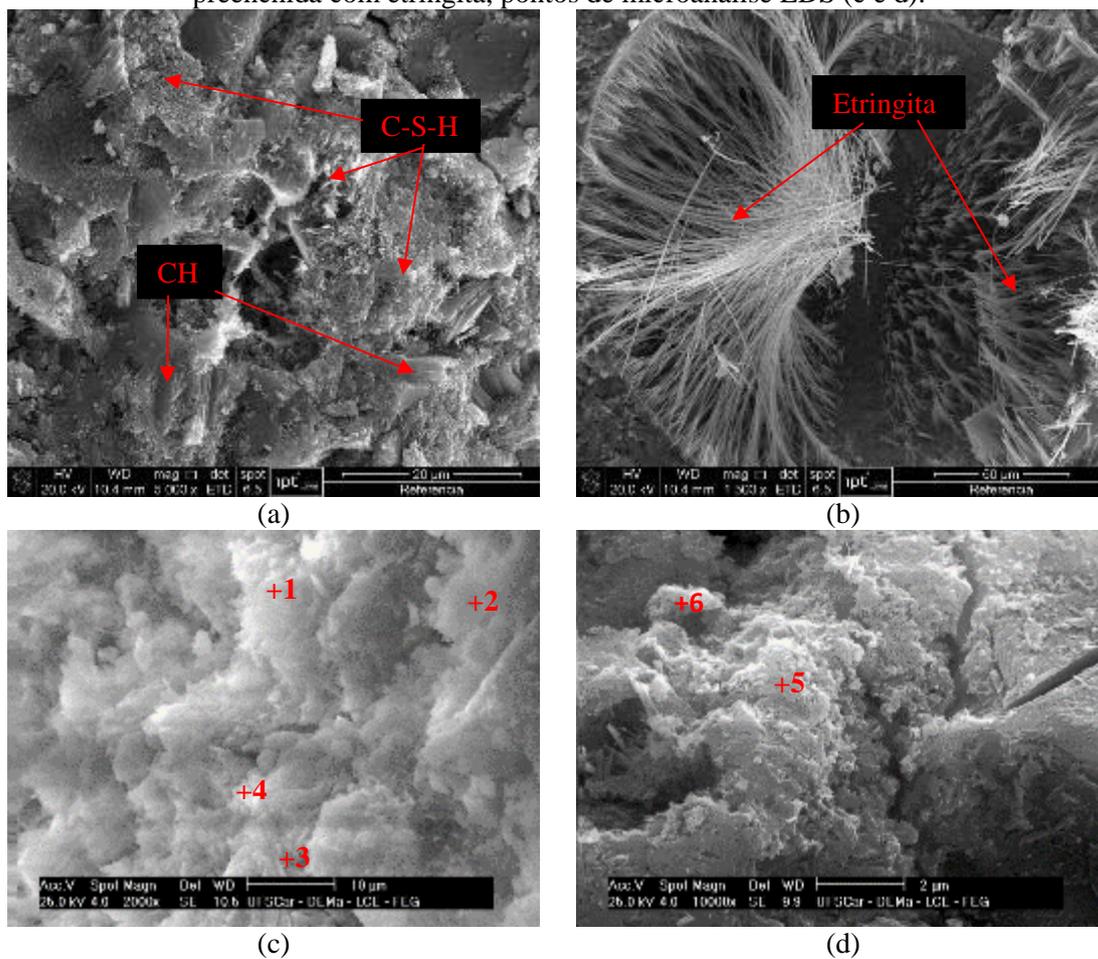
#### 4.2.11 Microscopia eletrônica de varredura das argamassas

A microestrutura das argamassas referência (0% ACBC) e 30% ACBC foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura. O fragmento escolhido para a análise foi extraído das argamassas com idade superior a 1 ano utilizadas no ensaio de resistividade elétrica.

Na Figura 72 pode-se observar as micrografias da amostra de argamassa referência (0% ACBC). Foi possível identificar a formação de C-S-H, portlandita (CH) (Figura 72 (a)) e a existência de uma bolha de ar preenchida com etringita (Figura 72 (b)).

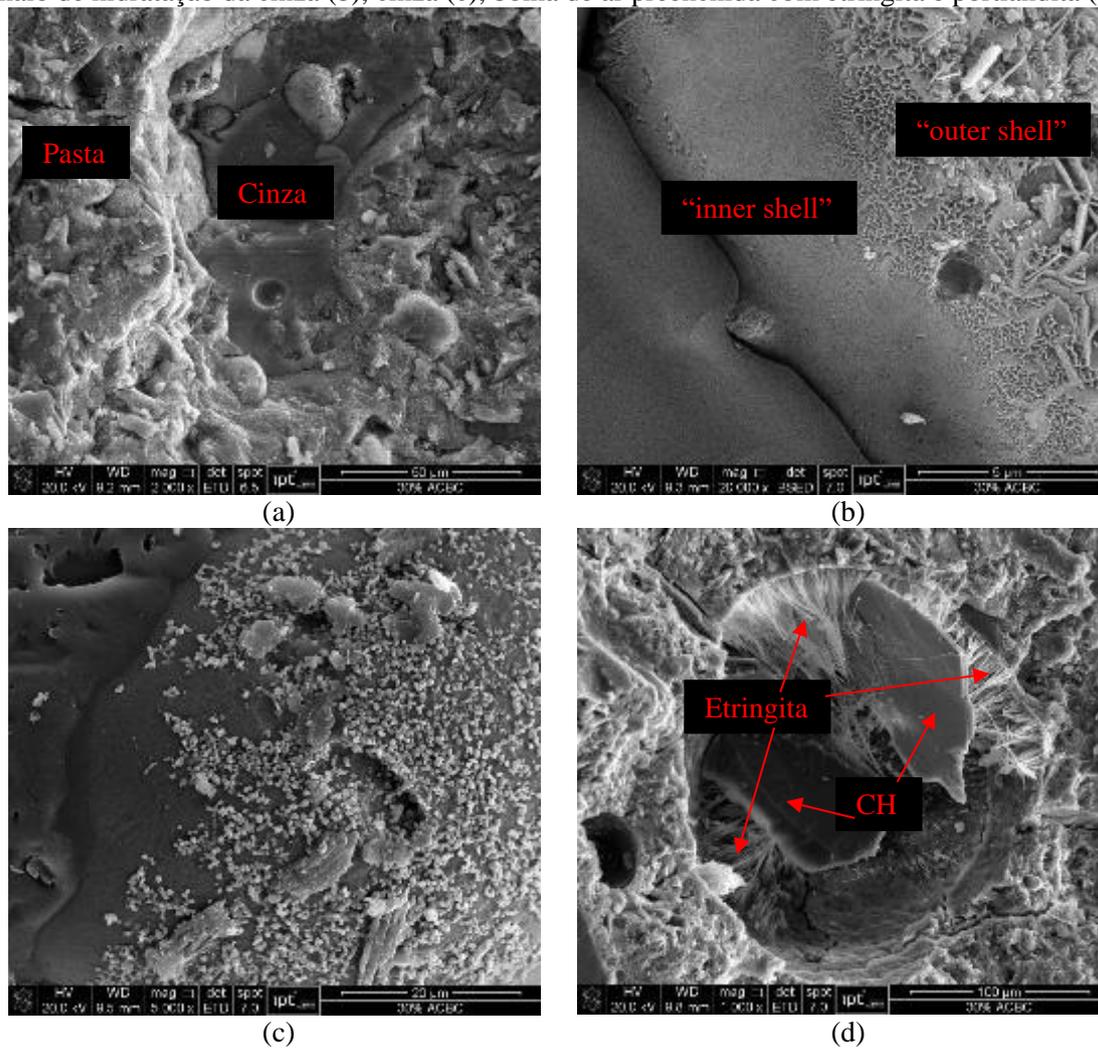
Foram realizadas microanálises com a finalidade de verificar a relação Ca/Si do C-S-H formado. Para a amostra de referência as relações Ca/Si foram de 2,61; 2,34; 2,27; 2,63; 2,58; e 2,67 para os pontos 1, 2, 3, 4 (Figura 72 (c)), 5, e 6 (Figura 72 (d)), respectivamente.

Figura 72- Micrografias da argamassa de Referência: formação de C-S-H e CH (a), bolha de ar preenchida com etringita, pontos de microanálise EDS (c e d).



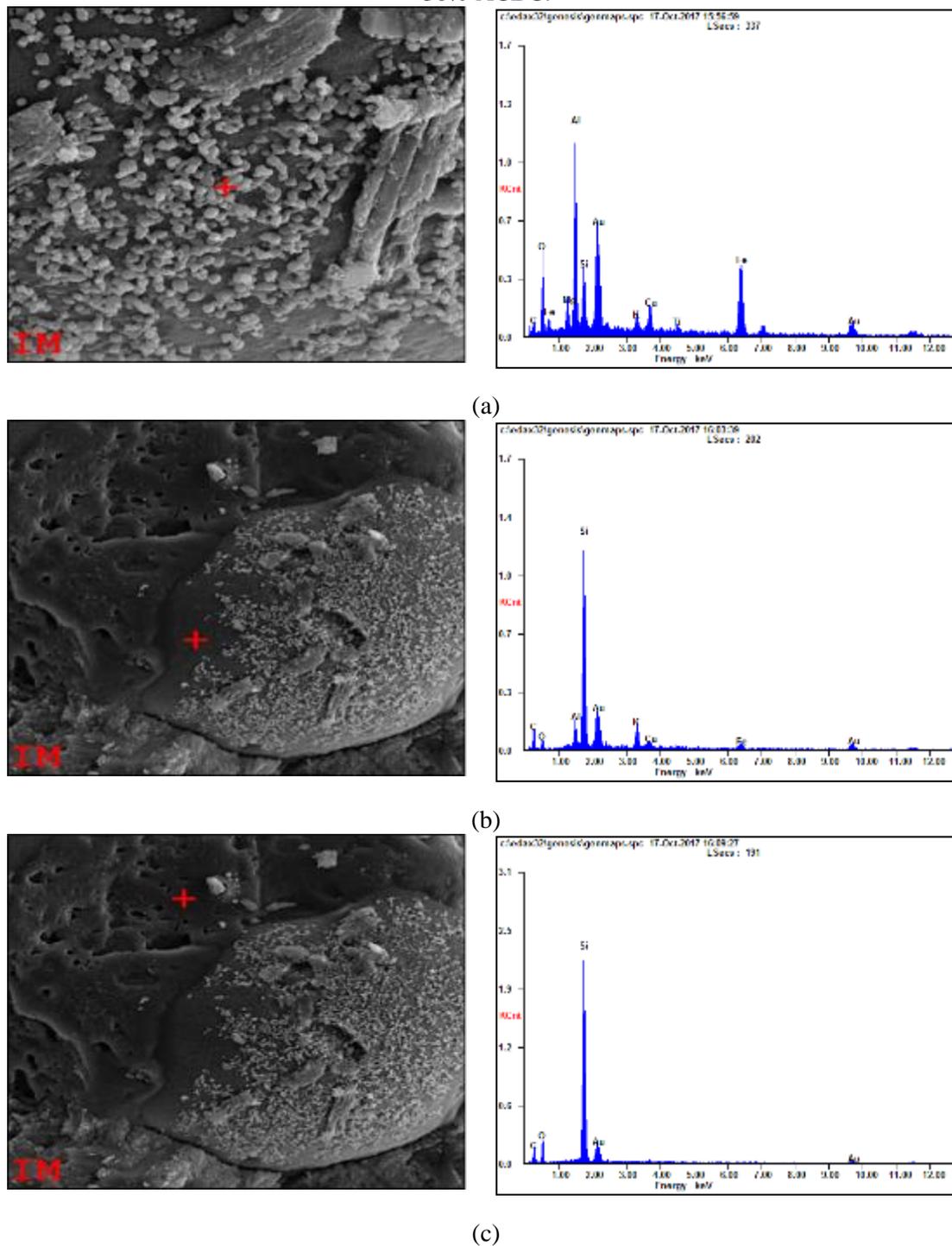
Na argamassa 30% ACBC foram identificadas partículas de cinza (Figura 73 (a) e (c)) e um halo de hidratação de uma partícula de cinza onde se verifica a região externa de hidratação, conhecida como “outer shell”, e a região interna, conhecida como “inner shell” (Figura 73 (b)). Além disso, foi identificada a formação de etringita e portlandita dentro de uma bolha de ar (Figura 73 (d)).

Figura 73- Micrografias da argamassa 30% ACBC: partícula de cinza e pasta de cimento (a), halo de hidratação da cinza (b), cinza (c), bolha de ar preenchida com etringita e portlandita (d).



Realizou-se uma microanálise da partícula de cinza identificada na argamassa 30% ACBC (Figura 73 (c)), onde foram identificados os seguintes elementos: alumínio, ferro, silício, cálcio, magnésio, cálcio, titânio e potássio (Figura 74). Esses resultados corroboram com a análise de fluorescência de raios-X (Tabela 19) e com a microanálise EDS realizada na amostra de ACBC (Figura 49).

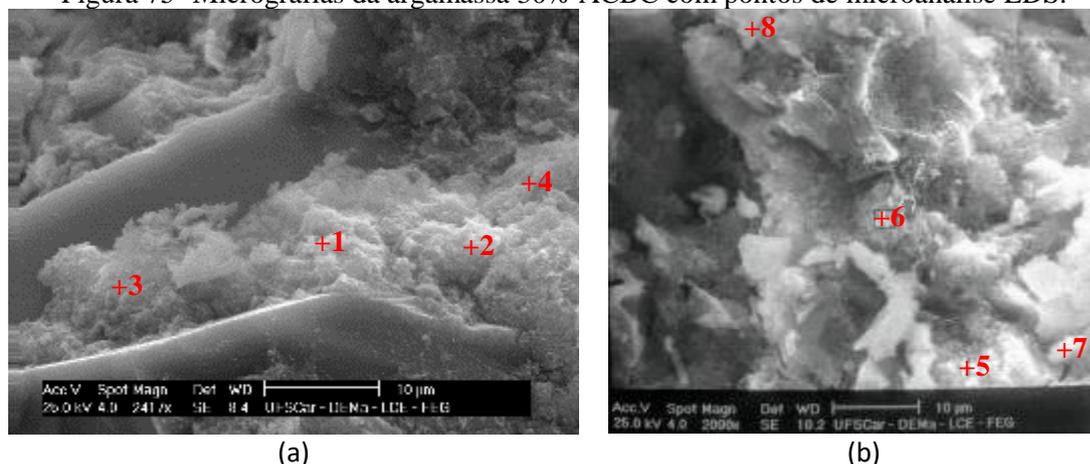
Figura 74- Microanálise das diferentes regiões da partícula de cinza incorporada na argamassa 30% ACBC.



Na argamassa produzida com a ACBC foi possível identificar a formação de C-S-H com menor relação Ca/Si quando comparada com a argamassa de referência. Isso pode ser verificado observando a Figura 75 nos pontos onde foram realizadas as microanálises, os quais apresentaram relação Ca/Si de 1,60; 1,37; 0,98; 1,16; 1,65; 1,96; 1,59; e 2,06 para os pontos 1, 2, 3, 4, (Figura 75 (a)), e 5, 6, 7, 8 (Figura 75 (b)), respectivamente. Esses resultados evidenciam a ocorrência da reação pozolânica. No

estudo realizado por Silva (2006) os concretos produzidos com sílica ativa apresentaram relação Ca/Si de 2,14; 0,91; e 0,76; e o concreto sem sílica de 2,31; 1,6; e 1,20. No estudo de Lam et al. (2000), o C-S-H formado a partir da reação pozolânica apresentou uma relação Ca/Si = 1,5.

Figura 75- Micrografias da argamassa 30% ACBC com pontos de microanálise EDS.



### 4.3 Passivação

#### 4.3.1 Condutividade elétrica e pH das soluções de água de poros.

Os resultados obtidos na caracterização das soluções de água de poro podem ser verificados na Tabela 30. Verificou-se que ambas as soluções apresentaram resultados similares tanto do pH como da condutividade elétrica. Ao comparar os resultados das soluções obtidas a partir da mistura dos materiais e das soluções obtidas com o material extraído das argamassas na idade de 365 dias (Tabela 30), verifica-se que o pH não sofreu alterações, ou seja, a solução continuou saturada pelo hidróxido de cálcio. Por outro lado, observa-se uma redução da condutividade elétrica de 43% para a solução referência e 42% para a solução 30% ACBC, sendo que essa redução ocorreu devido às reações de hidratação dos compostos do cimento que ocorrem com o passar do tempo.

Tabela 30- pH e condutividade elétrica das soluções de água de poro com e sem ACBC

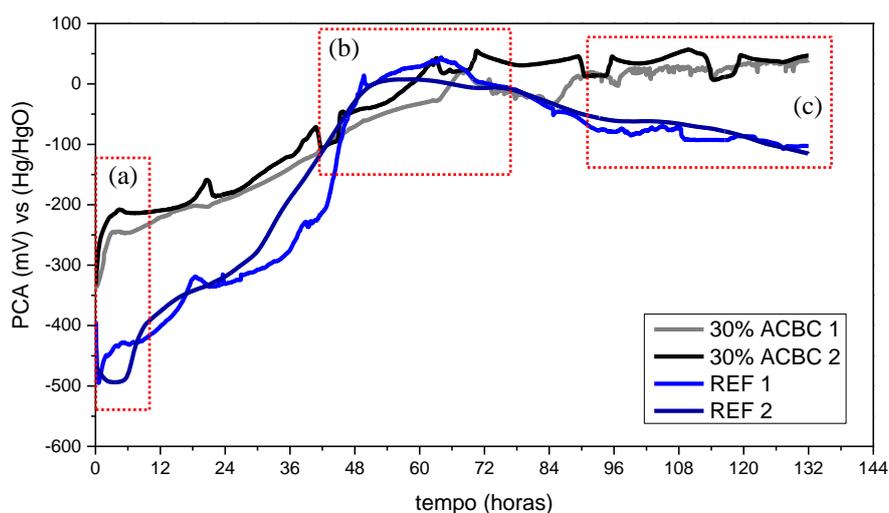
Soluções de água de poros	pH	Condutividade elétrica (mS/cm)
Referência	12,49 ± 0,01	10,95 ± 0,19
30% ACBC	12,44 ± 0,01	10,88 ± 0,21

### 4.3.2 Monitoramento do Potencial de circuito aberto (PCA).

Os resultados obtidos a partir do monitoramento do PCA para os eletrodos imersos nas soluções de água de poros REF e 30%ACBC estão apresentados na Figura 76.

No início do monitoramento (Figura 76 região “a”), os potenciais de corrosão do aço imerso na solução REF apresentaram valores menores que os eletrodos imersos na solução 30%ACBC. Com o passar do tempo, os potenciais dos eletrodos de ambas as soluções foram aumentando até atingirem valores mais próximos (Figura 76 região “b”). Entre as regiões (a) e (b) observa-se um grande aumento dos potenciais, evidenciando a etapa principal de crescimento do filme de passivação. A partir das 92 horas de monitoramento, observa-se que os potenciais tendem a se estabilizar (Figura 76 região “c”). Nessa etapa, infere-se que os óxidos formados estão mais estáveis. O mesmo comportamento do início do monitoramento foi observado ao final, sendo que o PCA dos eletrodos imersos nas soluções de ACBC apresentaram maior valor que o PCA do eletrodo imerso na solução REF, cerca de 150 mV de diferença. Em termos termodinâmicos, o PCA mais positivo do aço imerso na solução com ACBC indica uma condição de maior proteção que o aço imerso na solução de referência. Vale salientar que esse ensaio é estritamente qualitativo, e dessa forma não é possível relacionar esses resultados com a velocidade de despassivação/corrosão do aço.

Figura 76- Monitoramento do PCA dos eletrodos imersos nas soluções de REF e 30% ACBC.



Até a idade de monitoramento, os eletrodos expostos na solução de referência atingiram um potencial de 55 mV, e os eletrodos expostos na solução de ACBC atingiram

um potencial de 201 mV (em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio). Segundo Leek (1991), o potencial de circuito aberto para aços não corroídos em concretos está na faixa de + 100 a -200 mV (em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio). Além disso, considerando os potenciais indicados pela ASTM C876-91 (ASTM, 2009b) (Tabela 31) o eletrodo da solução referência encontra-se na zona de incerteza e o eletrodo exposto à solução de ACBC encontra-se na zona de < 10% de probabilidade de corrosão. Vale salientar que essa norma se refere à potenciais obtidos de corpos de prova de concreto, e os valores obtidos foram realizados em soluções, o que pode alterar significativamente os resultados. Por outro lado, no estudo realizado por Pacewska et al. (2002), o potencial de circuito aberto do aço passivado em soluções de concreto com diferentes teores de pozolana apresentou valores de potenciais variando de 841 a -59 mV. Além disso, Leek (1991) verificou na literatura uma ampla gama de PCA para aços passivados em soluções alcalinas, variando de -400 mV a +600 mV (em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio).

Tabela 31- Valores de Potencial para verificar a Probabilidade de corrosão

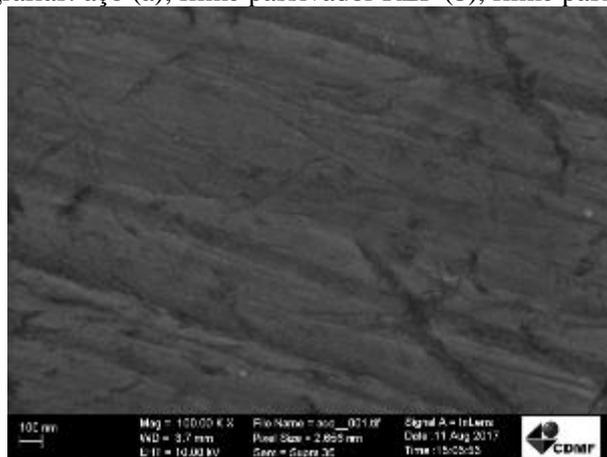
Probabilidade de corrosão	Potenciais de circuito aberto	
	ER Cu/CuSO <sub>4</sub> ASTM C876-91	ER NPE* convertido
< 10%	PCA > -200 mV	PCA > 100 mV
Incerta	-350 mV < PCA < -200 mV	-50 mV < PCA < 100 mV
> 90%	PCA < -350 mV	PCA < -50 mV

\*Eletrodo Padrão de Hidrogênio

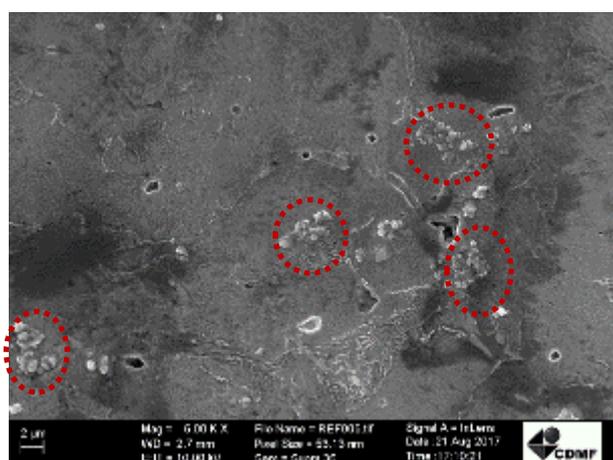
### 4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura.

Na Figura 77 estão apresentadas as micrografias da superfície do aço antes da exposição às soluções (a), e após a exposição na solução de REF (b), e na solução 30% ACBC (c). Nas duas condições de exposição (solução de Referência e solução 30% ACBC) observou-se que o aço foi recoberto pelo filme passivador, conforme pode ser observado pela diferença de superfície entre o aço antes (Figura 77 (a)) e depois da formação dos filmes (Figura 77 (b), (c)). Também foi possível observar diferenças entre as superfícies dos filmes formados pela solução de referência e solução 30% ACBC. Na solução 30% ACBC, observa-se um filme mais rugoso e com diversos precipitados com formato esférico. No entanto, na solução de referência observa-se uma superfície mais lisa e apenas em algumas regiões (destacadas em vermelho na Figura 77 (b)) foram observados precipitados esféricos.

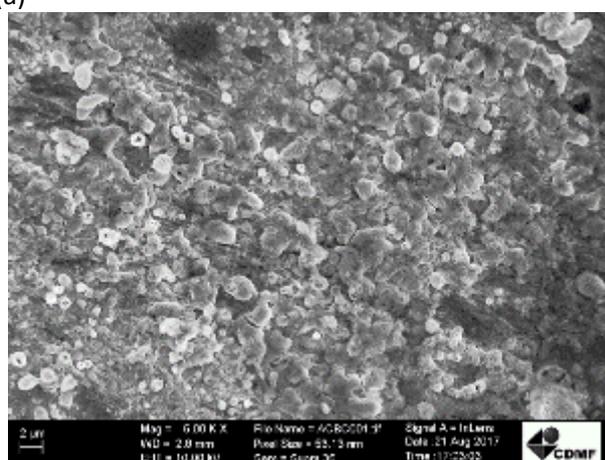
Figura 77- Micrografias: aço (a), filme passivador REF (b), filme passivador 30% ACBC (c).



(a)



(b)



(c)

Após a visualização das superfícies dos aços expostos nas diferentes soluções por meio da microscopia eletrônica de varredura, foi realizado um mapeamento de duas regiões onde se concentravam a precipitação das esferas com a finalidade de identificar a composição química dos filmes passivadores formados pela solução referência (Figura 79) e solução 30% ACBC (Figura 79). Ambos os filmes apresentaram em sua composição oxigênio, ferro, e cálcio. Pode-se observar pelo mapeamento que as esferas são compostas de oxigênio e cálcio, representados pelas cores cyan e vermelha, respectivamente. Também é possível visualizar uma maior quantidade de cálcio nas regiões dos cristais circulares na amostra 30% ACBC quando comparada com a amostra de referência. Além disso, observa-se uma maior quantidade de ferro no entorno dos cristais de ambos os filmes. A sonda penetra uma pequena profundidade da amostra (da ordem de 1  $\mu\text{m}$ ). Sabe-se que o filme passivador é extremamente fino, e sendo assim, além da identificação do ferro na forma de óxido que compõe o filme passivador, é possível identificar o ferro proveniente do próprio aço.

Figura 78- Mapeamento do filme referência

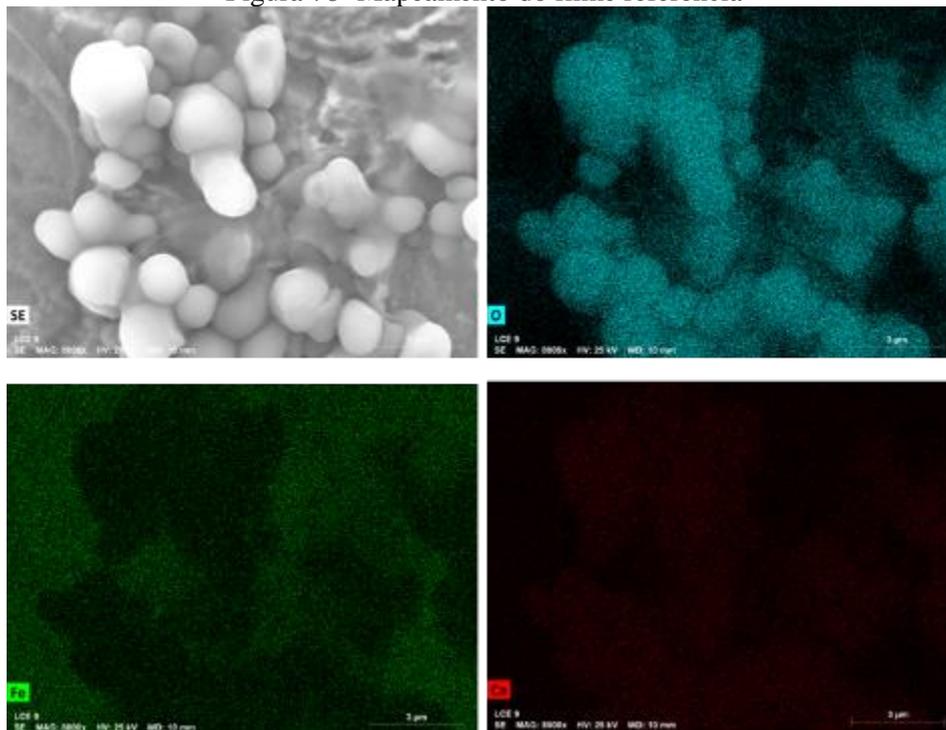
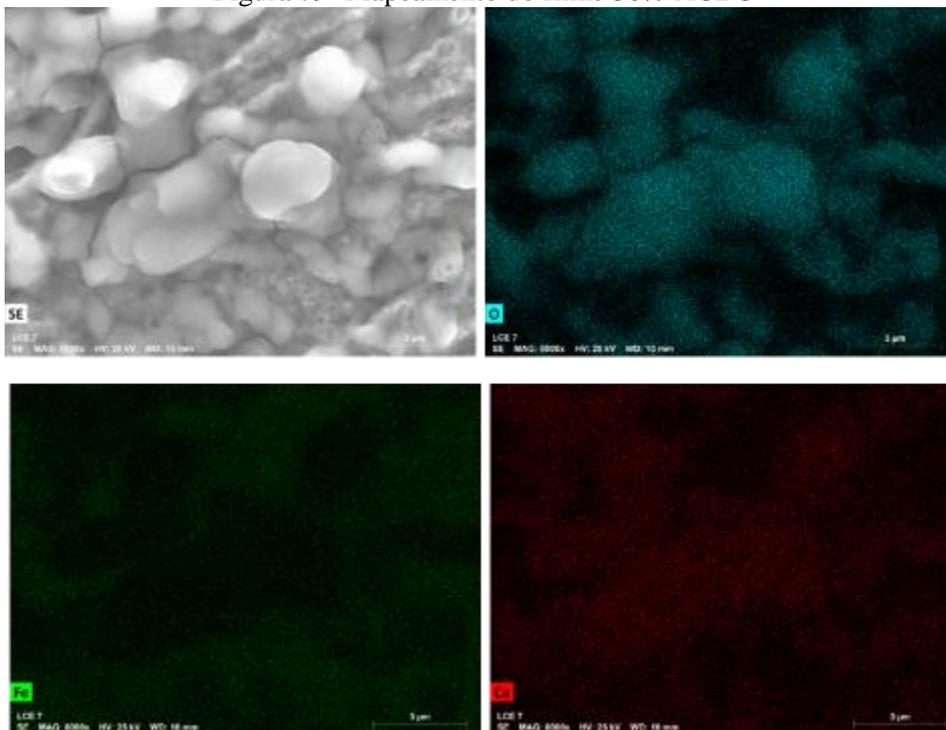


Figura 79- Mapeamento do filme 30% ACBC



Pode-se verificar na Tabela 322 os resultados obtidos na microanálise da região delimitada apresentada nas Figuras 78 e 79. O filme passivador formado pela solução 30% ACBC apresentou 9,4 vezes mais cálcio, 2,7 vezes mais oxigênio, e 2,8 vezes menos ferro que o filme formado pela solução de referência. Vale salientar que esse resultado

quantitativo se restringe a uma pequena região do filme passivador, ou seja, não é possível extrapolar esses valores para toda a superfície do metal, uma vez que a superfície do filme não é totalmente homogênea, principalmente no caso da amostra de referência, onde foram identificadas apenas algumas regiões com acúmulo de precipitados esféricos (Figura 77 (b)). Porém, pode-se afirmar que o filme formado pela solução de ACBC apresenta uma maior formação de óxidos de cálcio do que o filme de referência, pois, diferente do filme de referência, as imagens de MEV revelaram diversas regiões com acúmulos de precipitados esféricos (Figura 77 (c)). Veleva et al. (2002) também identificaram diferenças nos teores de Ca de filmes passivadores formados pela exposição do aço em solução de cimento em comparação com solução saturada com cal. O filme formado pela solução de cal saturada apresentou dez vezes mais cal do que o filme formado pela solução de cimento. O elevado teor de carbono identificado nas amostras pode ser proveniente de uma fonte de contaminação, como por exemplo contato com a oleosidade das mãos ao manusear a amostra.

Tabela 32 – Elementos identificados nos filmes passivadores.

Elementos	Referência (% massa)	30% ACBC (% massa)
Fe	56,53	20,04
O	19,00	52,04
Ca	0,10	0,94
C	24,37	26,98

Por meio dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas soluções de água de poros pode-se verificar que embora não tenha ocorrido alterações no pH e na condutividade elétrica das duas soluções (Ref e 30% ACBC), os filmes passivadores formados apresentaram diferenças no potencial de circuito aberto e também na morfologia. O maior potencial de circuito aberto e a maior quantidade de precipitados de cálcio verificados no filme formado em solução de ACBC são indícios de um estado de maior proteção do aço. Vale salientar que para a comprovação da hipótese de maior proteção, são necessários mais ensaios que possam mensurar em termos quantitativos a resistência e estabilidade dos filmes de passivação.

## 5 CONCLUSÕES

As hipóteses dessa pesquisa foram confirmadas, pois a incorporação da ACBC alterou tanto a distribuição de tamanho de poros das argamassas como a passivação das armaduras e morfologia dos filmes passivos.

Por meio dos resultados obtidos e análises realizadas durante o desenvolvimento desse estudo, pode-se concluir que:

- A redução do tamanho das partículas da ACBC proporcionou o aumento na reatividade pozolânica. Contudo, a reatividade apresentada não foi suficiente para a classificação das cinzas como material pozolânico;
- A ACBC apresentou grande quantidade de quartzo em sua composição, cerca de 70%, viabilizando assim sua aplicação como material inerte;
- A incorporação da ACBC contribuiu com a manutenção/aumento da resistência mecânica das matrizes;
- A incorporação da ACBC não afetou a porosidade total das argamassas, mas provocou alteração na distribuição do tamanho de poros, reduzindo principalmente os macroporos;
- As argamassas produzidas com a ACBC apresentaram maior resistividade elétrica nas idades mais avançadas (91 e 365 dias), quando comparadas com a argamassa de referência;
- A incorporação da ACBC não afetou a absorção de água por capilaridade;
- Os resultados indicam que as argamassas produzidas com a ACBC são menos permeáveis que a argamassa de referência;
- As argamassas produzidas com a ACBC apresentaram maior resistência à migração/difusão de cloretos do que a argamassa de referência para a idade de 91 dias;
- Ocorreu a colmatação/aumento de tortuosidade de poros nas matrizes produzidas com a ACBC devido à reação pozolânica.
- De modo geral, o teor de substituição que proporcionou os melhores resultados foi o de 30%. A utilização do teor de 40% provocou defeitos na matriz cimentícia devido aos problemas de dispersão das partículas.
- A idade de 28 dias não é suficiente para avaliar as propriedades de matrizes produzidas com a incorporação de resíduos com alguma pozolanicidade. Isso foi observado no presente estudo, pois mesmo apresentando baixa

reatividade, as matrizes produzidas com a ACBC apresentaram uma evolução na resistividade elétrica e na resistência à penetração de cloretos em idades mais avançadas;

- Os resultados obtidos no ensaio de potencial de circuito aberto indicam que o aço imerso em solução de água de poros com ACBC está mais protegido da corrosão, em termos termodinâmicos;
- O filme passivador formado pela solução de água de poros com ACBC apresentou maior quantidade de cálcio do que o filme formado pela solução de referência. Esse resultado aponta para a maior formação de óxidos de cálcio na superfície do metal exposto à solução com ACBC em comparação com a solução de referência;
- Os resultados obtidos a partir do monitoramento e do PCA, juntamente com a análise das imagens microscópicas indicam uma possível melhora na qualidade do filme passivador formado em solução contendo ACBC.

De modo geral, pode-se concluir que a ACBC melhorou as propriedades das argamassas, e, esses resultados podem significar ganhos de durabilidade.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Segue abaixo algumas sugestões para dar continuidade ao estudo desenvolvido:

- Avaliar a permeabilidade ao gás e à água das argamassas;
- Aplicar outros métodos de ensaio com a finalidade de determinar o coeficiente de difusão de cloretos para as argamassas;
- Analisar a composição e concentração iônica das soluções de água de poros com a finalidade de entender as diferenças de formação dos filmes passivadores;
- Analisar a qualidade dos filmes passivadores por meio de ensaios quantitativos, como: curvas de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica;
- Aplicar técnicas mais avançadas para a caracterização dos óxidos formados nos filmes passivadores, bem como para verificar se há diferença na espessura desses diferentes filmes;
- Verificar a resistência dos filmes passivadores em meio de cloretos.

## 7 REFERÊNCIAS

ABBAS, A. et al. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. **Materials Characterization**, v. 60, n. 7, p. 716–728, 2009.

ABNT. **NBR 11172 – Aglomerantes de origem mineral - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT. **NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial - Especificação**, Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. **NBR 7215 – Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. **NBR NM 23 – Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001a.

ABNT. **NBR NM 30 – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001b.

ABNT. **NBR NM 49 – Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro, 2001c.

ABNT. **NBR NM 65 Cimento portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003a.

ABNT. **NBR NM 46 - Determinação do material fino que passa através da peneira de 0,075 mm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003b.

ABNT. **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, 2003c.

ABNT. **NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005a.

ABNT. **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005b.

ABNT. **NBR NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

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

ABNT. **NBR NM 53 – Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009b.

ABNT. **NBR 7211 – Agregados para concretos**. Rio de Janeiro, 2009c.

ABNT. **NBR 7218 – Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2010a.

ABNT. **NBR 15895 – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010b.

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

ABNT. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Especificações**. Rio de Janeiro, 2014a.

ABNT. **NBR 5752 – Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014b.

ABNT. **NBR 5751 - Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015.

ACI 222R-01. **Protection of Metals in Concrete Against Corrosion: Reported by ACI Committee 222**. [s.l: s.n.].

AGAR-OZBEK, A. S. et al. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 480–490, 2013.

AKRAM, T.; MEMON, S. A.; OBAID, H. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 703–712, 2009.

ALMEIDA, F. C. R. **Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concretos com substituição parcial do agregado miúdo pela areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar - ACBC**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, 2013.

ALMEIDA, F. C. R. et al. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31–38, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202: Standard test method for electrical indication of concrete 's ability to resist chloride ion penetration**. Philadelphia, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G57: Standard method for field measurement of soil resistivity using the wenner four electrode method**. Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 323: Standard Specification for Perforated-Plate Sieves for testing Purposes**. Philadelphia, 2009a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876-91: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.** Philadelphia, 2009b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1-03: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens.** Philadelphia, 2011.

AMIN, N. Use of bagasse ash in cement and its impact on the mechanical behaviour and chloride resistivity of mortar. **Advances in Cement Research**, v. 23, n. 2, p. 75–80, 2011.

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

ANJOS, M. A. S. DOS. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2009.

ARIF, E.; CLARK, M. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 692–703, 2017.

BAHURUDEEN, A. et al. Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 465–475, out. 2014.

BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 77–88, 2015.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 32–45, fev. 2015.

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications.** Second Edition. NY: John Wiley & Sons, 2000.

BATRA, V. S.; URBONAITE, S.; SVENSSON, G. Characterization of unburned carbon in bagasse fly ash. **Fuel**, v. 87, n. 13-14, p. 2972–2976, out. 2008.

BENEZET, J. C., BENHASSAINE, A. The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder. **Powder Technology**, v. 103, p. 26–29, 1999.

BENTZ, D. P. P. et al. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials I. Experimental and computer modeling studies on cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 6, p. 953–962, 2000.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia/reabilitação/prevenção.** São Paulo. Oficina de textos, 2010. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BIJEN, J. Benefits of slag and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5 SPEC. ISS., p. 309–314, 1996.

BIRGUL, R. Monitoring macro voids in mortar by X-ray computed tomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 596, n. 3, p. 459–466, 2008.

BURLION, N.; BERNARD, D.; CHEN, D. X-ray microtomography: Application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, p. 346–357, 2006.

CARVALHO, A. C. P. História da tomografia computadorizada. **Boletim do Colégio Brasileiro de Radiologia**, v. 29, n. 2, p. 61–66, 2002.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. Goiânia: PINI, 1997.

CHUNG, S. Y. et al. Investigation of the permeability of porous concrete reconstructed using probabilistic description methods. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 760–770, 2014.

CHUNG, S.-Y. et al. Investigation of characteristics and responses of insulating cement paste specimens with Aer solids using X-ray micro-computed tomography. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 204–215, 2016.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3352–3358, 2009a.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 12, p. 3523–3531, 2009b.

CINCOTTO, M. A. **Disciplina PCC 5042 “ Ciência dos materiais aplicada aos ligantes inorgânicos ”**. São Paulo, 2014.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar safra 2015/16**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_12\\_17\\_09\\_03\\_29\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_3o\\_lev\\_-\\_15-16.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_09_03_29_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_15-16.pdf)>.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 410–418, 2008.

CORDEIRO, G. C. et al. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 2, p. 110–115, 2009.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3301–3303, 2009.

COURARD, L. et al. Durability of mortars modified with metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 9, p. 1473–1479, 2003.

DE SOARES, M. M. N. S. et al. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 20–25, 2016.

DIAMOND, S. Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based material. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1517–1525, 2000.

ELAQRA, H. et al. Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography: Effects of the sand/cement ratio. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 703–713, 2007.

ELSEN, J. Microscopy of historic mortars-a review. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 8, p. 1416–1424, 2006.

FELDMAN, R.F., H. C. Properties of Portland cement-silica fume pastes II. Mechanical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 15, n. c, p. 943–952, 1985.

FERRAZ, E. et al. Pozzolanic activity of metakaolins by the French standard of the modified Chapelle test: A direct methodology. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 12, n. 3, p. 289–298, 2015.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)**. Disponível em: <[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:wzzgWS1X\\_wIJ:www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4505+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:wzzgWS1X_wIJ:www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4505+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br)>.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 490–496, 2011.

GALLÉ, C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry - A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1467–1477, 2001.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 515–524, 2007.

GHODS, P. et al. The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 1, p. 2–11, 2009.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. . Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1301–1311, 2002.

GONEN, T.; YAZICIOGLU, S. The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 3080–3085, 2007.

GOVINDARAJAN, D.; JAYALAKSHMI, G. XRD , FTIR and Microstructure Studies of Calcined Sugarcane Bagasse Ash. v. 2, n. 3, p. 544–549, 2011.

GUANGLING, S. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 11, p. 1723–1730, 2000.

HALL, C.; MARCHESE, B.; D'AMORE, F. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. **Magazine of Concrete Research**, v. 41, n. 147, p. 51–61, 1989.

HANEHARA, S. et al. Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 1, p. 31–39, 2001.

HELENE, P. Vida útil das estruturas. *Thécne*, p. 28–31, 1995.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60–72, 2013.

JENDIROBA, E. **Aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. In: Gestão de resíduos na agricultura e na agroindústria**. Botucatu: FEPAF, 2006.

JIMÉNEZ-QUERO, V. G. et al. Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 691–701, 2013.

JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M. A. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 818–831, 2017.

KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1–15, 2017.

KATZ, A. J.; THOMPSON, A. H. Quantitative prediction of permeability in porous rock. **Physical Review B**, v. 34, n. 11, p. 8179–8181, 1986.

KETTELER, G. et al. Bulk and surface phases of iron oxides in an oxygen and water atmosphere at low pressure. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 3, n. 6, p. 1114–1122, 2001.

LAM, L.; WONG, Y. L.; POON, C. S. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 747–756, 2000.

LANGE, F.; MÖRTEL, H.; RUDERT, V. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 10, p. 1481–1488, 1997.

LANZÓN, M. et al. X-ray microtomography (??-CT) to evaluate microstructure of mortars containing low density additions. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 993–1000, 2012.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 1939–1947, 2003.

LEEK, D. S. The Passivity of Steel in Concrete. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 24, n. 1, p. 55–66, 1991.

LI, B. et al. Mesoscopic damage model of concrete subjected to freeze-thaw cycles using mercury intrusion porosimetry and differential scanning calorimetry (MIP-DSC). **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 79–90, 2017.

LIMA, S. A. Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana. **Engenharia Urbana**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

LIMA, S. A. et al. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído (Online)**, v. 11, p. 201–212, 2011.

LOBATO, E. **A Mineração Brasileira**. Relatório Técnico 37. Perfil do Quartzo, 2009. Disponível em [http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P27\\_RT37\\_Perfil\\_do\\_Quartzo.pdf/3ea3802c-8da9-4012-a246-c722d750de1f](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P27_RT37_Perfil_do_Quartzo.pdf/3ea3802c-8da9-4012-a246-c722d750de1f).

MALDONADO-BANDALA, E. E. et al. Electrochemical characterization of modified concretes with sugar cane bagasse ash. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 6, n. 10, p. 4915–4926, 2011.

MANHÃES, M. S. **Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria**. Campos dos Goytacazes: In: Tecnologia canavieira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo – Boletim Técnico n. 12, : UFRRJ, 1999.

MANSO, J. M. et al. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3508–3519, 2011.

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

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3<sup>a</sup>. ed. 2006.

MICROMERITICS. **Mercury Intrusion Porosimetry**. Disponível em: <<http://www.micromeritics.com/product-showcase/AutoPore-IV/AutoPore-Technique-Overview.aspx>>.

MIGNON, A. et al. PH-responsive superabsorbent polymers: A pathway to self-healing of mortar. **Reactive and Functional Polymers**, v. 93, p. 68–76, 2015.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2<sup>a</sup> ed, Pearson, 2003.

MIRIELLO, D. et al. Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, n. 9, p. 2207–2223, 2010.

MODANI, P. O.; VYAWAHARE, M. R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete. **Procedia Engineering**, v. 51, n. NUiCONE 2012, p. 25–29, 2013.

MONTAKARNTIWONG, K. et al. Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry. **Materials and Design**, v. 49, p. 414–420, 2013.

MOOSBERG-BUSTNES, H. The function of fillers in concrete. **Materials and Structures**, v. 37, n. 266, p. 74–81, 2004.

MORENO, M. et al. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions effect of carbonation and chloride content. **Corrosion Science**, v. 46, n. 11, p. 2681–2699, 2004.

MORETTI, J. P. et al. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317–323, 2016.

MÜLLER, U.; RÜBNER, K. The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 8, p. 1434–1443, 2006.

NARMLUK, M.; NAWA, T. Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 6, p. 579–589, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5<sup>a</sup>. ed. 2015.

OLIVEIRA, C. T. A.; AGOPYAN, V. **Estudo da água do poro de pastas de cimento de escória pelo método da água de equilíbrio**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/259, EPUSP, 2000.

OLLIVIER, J. P., TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: ED OLLIVIER, J. P., VICHOT, A. ED. **TRADUÇÃO CASCUDO, O., CARASEK, H. (Ed.).** . São Paulo: IBRACON, 2014. p. 41–112.

ORANOWSKA, H.; SZKLARSKA-SMIALOWSKA, Z. An electrochemical and ellipsometric investigation of surface films grown on iron in saturated calcium hydroxide solutions with or without chloride ions. **Corrosion Science**, v. 21, n. 11, p. 735–747, 1981.

PACEWSKA, B. et al. Modification of the properties of concrete by a new pozzolan - A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 1, p. 145–152, 2002.

PAVÍA, S.; CARO, S. An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1807–1811, 2008.

POURSAEE, A.; HANSSON, C. M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 7, p. 1127–1133, 2007.

QUARCIONI, V. A. et al. Indirect and direct Chapelle ' s methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials Métodos de ensaio indiretos e método Chapelle direto. v. 8, n. 1, p. 1–7, 2015.

RIBEIRO, D. V. et al. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2014.

RILEM. **Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete: TC 166 PCD**. Materials and Structures, Vol. 32, pp 174-179, 1999.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials and Design**, v. 34, p. 45–50, 2012a.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials and Design**, v. 34, p. 45–50, fev. 2012b.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v. 30, p. 1114–1122, 2010.

SCHRÖFL, C.; MECHTCHERINE, V.; GORGES, M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 6, p. 865–873, 2012.

SCHRÖFL, C.; SNOECK, D.; MECHTCHERINE, V. A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based

construction materials: report of the RILEM TC 260-RSC. **Materials and Structures**, v. 50, n. 4, p. 197, 2017.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 3, p. 537–545, 2004.

SILVA, D. C. B.; BALDO, C. R. X-Ray Computed Tomography Applied as a Comprehensive Technique for Material Analysis and Dimensional Measurement of Metallic Parts. **Key Engineering Materials**, v. 613, p. 335–343, 2014.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, USP, São Carlos, 2006.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1485–1488, 2000.

SNOECK, D. et al. Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 8, p. 1113–1121, 2012.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 308–319, 2013a.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 308–319, 2013b.

TUMIDAJSKI, P. J. Relationship between resistivity, diffusivity and microstructural descriptors for mortars with silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 7, p. 1262–1268, 2005.

TUTIKIAN, B. F., DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

UNICA. **Histórico de produção e moagem**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>>. Acesso em: mar. 2018a.

UNICA. A Bioeletricidade da cana em números. p. 5, 2015b.

UNICA. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 12 set. 2017.

UYSAL, M.; YILMAZ, K.; IPEK, M. The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 263–270, 2012.

VAN DEN HEEDE, P.; GRUYAERT, E.; DE BELIE, N. Transport properties of high-volume fly ash concrete: Capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 10, p. 749–756, 2010.

VELEVA, L. et al. Comparative cyclic voltammetry and surface analysis of passive films grown on stainless steel 316 in concrete pore model solutions. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 537, n. 1-2, p. 85–93, 2002.

WINSLOW, D.; LIU, D.; LAFAYETTE, W. The pore structure of paste in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. c, p. 227–235, 1990.

XIAO, L.; LI, Z. Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 3, p. 312–319, 2008.

ZIMER, A. M. **Estudo da corrosão do aço ao carbono em meio de sulfeto**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 2009.

## ANEXO A

Os dados utilizados para calcular a absorção de água, índice de vazios e massa específica para as argamassas nas idades de 7, 28 e 39 dias estão apresentados nas Tabelas 33, 34 e 35.

Tabela 33 – Dados do ensaio de absorção de água aos 7 dias.

Amostras/Traços	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Massa após resfriamento - Ms (gramas)					
Amostra 1	397,86	402,64	402,96	404,28	406,10
Amostra 2	396,65	404,70	404,34	404,95	403,45
Amostra 3	397,64	402,17	404,54	402,04	405,48
Amostra 4	396,38	403,48	403,46	406,35	408,00
Massa saturada após 72 horas de imersão - Msat (gramas)					
Amostra 1	431,39	436,16	437,38	438,21	441,03
Amostra 2	430,39	438,64	438,87	439,33	437,62
Amostra 3	431,35	436,96	439,99	435,89	439,97
Amostra 4	430,16	438,27	437,93	440,37	442,67
Massa imersa após 72 horas de imersão - Mi (gramas)					
Amostra 1	236,37	240,10	241,46	241,79	243,19
Amostra 2	235,52	241,12	241,34	242,70	240,91
Amostra 3	236,22	239,69	242,00	241,40	243,00
Amostra 4	235,20	240,73	241,08	242,83	244,72

Tabela 34 – Dados do ensaio de absorção de água aos 28 dias.

Amostras/Traços	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Massa após resfriamento - Ms (gramas)					
Amostra 1	397,50	404,88	405,37	407,37	402,11
Amostra 2	400,38	400,93	405,16	402,66	404,39
Amostra 3	401,65	403,40	404,88	407,37	405,57
Amostra 4	401,55	398,75	405,54	406,04	407,43
Massa saturada após 72 horas de imersão - Msat (gramas)					
Amostra 1	431,81	439,18	439,21	441,22	437,08
Amostra 2	434,41	435,16	438,96	436,61	439,49
Amostra 3	435,89	436,96	438,90	441,18	440,86
Amostra 4	435,65	432,28	439,48	439,87	441,16
Massa imersa após 72 horas de imersão - Mi (garmas)					
Amostra 1	235,97	241,41	241,93	244,09	240,82
Amostra 2	237,31	239,20	242,06	241,09	242,37
Amostra 3	238,42	240,66	242,00	243,93	243,80
Amostra 4	238,52	238,59	242,29	242,99	244,32

Tabela 35 – Dados do ensaio de absorção de água aos 91 dias.

Amostras/Traços	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Massa após resfriamento - Ms (gramas)					
Amostra 1	402,87	405,52	404,74	406,32	407,02
Amostra 2	402,92	403,65	400,25	406,58	408,43
Amostra 3	402,43	408,18	404,53	405,69	406,84
Amostra 4	400,67	402,09	404,38	405,59	405,58
Massa saturada após 72 horas de imersão - Msat (gramas)					
Amostra 1	436,19	437,77	436,27	440,00	441,18
Amostra 2	436,32	435,24	432,36	440,72	442,68
Amostra 3	434,86	439,88	439,47	439,88	441,88
Amostra 4	433,40	433,69	438,18	439,17	439,96
Massa imersa após 72 horas de imersão - Mi (garmas)					
Amostra 1	239,01	239,72	239,10	241,99	243,95
Amostra 2	239,30	239,50	237,58	242,92	244,61
Amostra 3	238,60	242,15	241,45	243,14	243,98
Amostra 4	237,31	238,48	241,17	241,30	242,88

## ANEXO B

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7, 28, 91 e 365 dias de cada amostra estão apresentados nas Tabelas 36, 37, 38 e 39.

Tabela 36 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 7 dias.

Amostras/Traços	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Amostra 1	41,10	39,00	43,00	38,80	45,80
Amostra 2	40,70	39,80	46,40	39,90	47,40
Amostra 3	40,30	35,30	42,50	39,60	45,30
Amostra 4	41,00	38,60	44,00	38,50	46,20
Amostra 6	40,00	38,80	46,60	36,90	46,40
Amostra 6	40,40	39,20	46,20	38,80	45,30
Média (MPa)	40,58	38,45	44,78	38,75	46,07
Desvio Padrão (MPa)	0,43	1,60	1,84	1,05	0,79
Coeficiente de variação (%)	1,05	4,15	4,11	2,72	1,72

Tabela 37 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 28 dias.

Amostras/Traços	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Amostra 1	45,30	49,20	49,20	47,90	49,80
Amostra 2	47,30	49,80	46,90	47,30	49,60
Amostra 3	45,30	47,30	48,10	50,20	50,30
Amostra 4	44,30	49,20	49,50	50,90	49,60
Amostra 6	46,10	48,00	46,60	50,90	49,60
Amostra 6	46,20	49,80	49,20	50,90	52,10
Média (MPa)	45,75	48,88	48,25	49,68	50,17
Desvio Padrão (MPa)	1,02	1,02	1,26	1,65	0,99
Coeficiente de variação (%)	2,24	2,08	2,61	3,32	1,96

Tabela 38 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 91 dias.

Amostras/Traços	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Amostra 1	52,20	53,30	50,70	54,40	57,80
Amostra 2	52,10	54,10	55,90	52,70	58,10
Amostra 3	54,50	54,00	55,00	57,50	59,00
Amostra 4	52,50	50,50	56,30	54,40	57,10
Amostra 6	52,90	55,00	54,50	52,20	53,90
Amostra 6	53,00	54,10	55,20	49,40	55,90
Média (MPa)	52,87	53,50	54,60	53,43	56,97
Desvio Padrão (MPa)	0,88	1,57	2,02	2,71	1,83
Coeficiente de variação (%)	1,66	2,93	3,69	5,07	3,21

Tabela 39 - Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 365 dias.

Amostras/Traços	REF	10% ACBC	20% ACBC	30%ACBC	40% ACBC
Amostra 1	57,50	61,70	59,20	56,90	63,60
Amostra 2	57,20	59,20	60,30	57,80	65,50
Amostra 3	56,80	62,20	55,10	58,80	59,30
Amostra 4	58,00	61,70	60,60	53,90	57,20
Amostra 6	59,30	58,20	58,30	56,70	60,80
Média (MPa)	57,76	60,60	58,70	56,82	61,28
Desvio Padrão (MPa)	0,97	1,78	2,21	1,83	3,32
Coefficiente de variação (%)	1,67	2,94	3,77	3,22	5,41

## ANEXO C

Os dados utilizados para calcular a absorção de água por capilaridade e sortividade das argamassas aos 7, 28 e 91 dias estão apresentados nas Tabelas 40, 41 e 42.

Tabela 40 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 7 dias.

Amostras	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Massa após preparo resfriamento e impermeabilização com silicone (gramas)					
Amostra 1	406,15	404,88	413,56	410,06	407,95
Amostra 2	401,41	404,14	405,1	407,56	408,98
Amostra 3	396,34	406,57	409,47	404,56	406,72
Amostra 4	400,85	399	409,15	406,1	404,43
Massa após 3 horas (gramas)					
Amostra 1	410,06	409,24	417,29	414,85	412,76
Amostra 2	405,64	408,08	409,18	411,77	413,44
Amostra 3	400,74	410,86	413,44	409,66	411,3
Amostra 4	405,01	403,26	413,6	410,97	408,91
Massa após 6 horas (gramas)					
Amostra 1	412,08	411,36	419,4	417,23	415,1
Amostra 2	407,96	410,1	411,14	413,82	415,68
Amostra 3	403,09	413,02	415,25	412,1	413,59
Amostra 4	407,21	405,3	415,5	413,2	411,05
Massa após 24 horas (gramas)					
Amostra 1	418,06	417,24	425,75	424,75	422,57
Amostra 2	414,86	415,95	416,84	420,18	422,63
Amostra 3	409,92	419,21	421,1	419,11	420,97
Amostra 4	413,84	411,12	421,62	419,78	417,7
Massa após 48 horas (gramas)					
Amostra 1	422,29	421,38	430,11	429,73	427,49
Amostra 2	419,59	420,07	420,91	424,73	427,08
Amostra 3	414,71	423,5	425,25	423,83	426,3
Amostra 4	418,61	415,29	426,11	424,49	422,14
Massa após 72 horas (gramas)					
Amostra 1	424,86	423,91	432,91	432,79	430,63
Amostra 2	422,35	422,68	423,54	427,63	429,9
Amostra 3	417,54	426,12	427,99	426,7	429,6
Amostra 4	421,41	417,88	429,16	427,4	424,95

Tabela 41 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

Amostras	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Massa após preparo resfriamento e impermeabilização com silicone (gramas)					
Amostra 1	402,67	404,5	405,59	404,79	404,72
Amostra 2	405,12	406,94	406,38	407,13	403,82
Amostra 3	402,39	405,99	406,42	407,37	404,63
Amostra 4	401,19	405,79	405,5	406,22	406,86
Massa após 3 horas (gramas)					
Amostra 1	406,77	408,05	409,84	408,95	408,82
Amostra 2	409,12	411,1	410,82	411,41	408,95
Amostra 3	406,48	410,84	409,65	411,8	409,69
Amostra 4	405,42	409,67	409,36	410,56	411,29
Massa após 6 horas (gramas)					
Amostra 1	408,43	409,51	411,64	410,57	410,45
Amostra 2	410,99	412,69	412,58	413,17	411,05
Amostra 3	408,38	413,04	410,99	413,66	411,78
Amostra 4	407,07	411,2	411,09	412,31	413,21
Massa após 24 horas (gramas)					
Amostra 1	414,85	415,5	418,61	416,72	416,66
Amostra 2	418,42	419,29	419,03	419,73	418,22
Amostra 3	415,65	420,61	416,57	420,53	419,25
Amostra 4	413,95	417,69	417,88	418,93	420,34
Massa após 48 horas (gramas)					
Amostra 1	419,67	419,88	423,92	421,51	421,81
Amostra 2	423,81	424,27	423,88	424,88	423,54
Amostra 3	420,79	425,83	420,85	425,65	424,85
Amostra 4	419,39	422,89	422,95	423,87	425,91
Massa após 72 horas (gramas)					
Amostra 1	423,13	423,13	427,61	425,08	425,68
Amostra 2	427,67	427,98	427,48	428,57	427,45
Amostra 3	424,54	429,54	424,01	429,38	428,71
Amostra 4	423,27	426,70	426,56	427,46	430,00

Tabela 42 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 91 dias.

Amostras	REF	10% ACBC	20% ACBC	30% ACBC	40% ACBC
Massa após preparo resfriamento e impermeabilização com silicone (gramas)					
Amostra 1	424,15	427,18	429,16	430,02	427,26
Amostra 2	422,8	423,48	425,63	432,03	429,74
Amostra 3	417,5	427,22	427,44	429,56	426,3
Amostra 4	423,97	427,28	429,45	428,68	428,45
Massa após 3 horas (gramas)					
Amostra 1	426,74	429,82	431,71	432,43	429,86
Amostra 2	425,33	426,12	428,26	434,84	432,3
Amostra 3	419,98	429,73	429,95	431,98	428,87
Amostra 4	426,49	429,74	432,14	431,27	430,99
Massa após 6 horas (gramas)					
Amostra 1	427,35	430,48	432,34	432,99	430,5
Amostra 2	425,95	426,77	428,94	435,45	432,85
Amostra 3	420,66	430,4	430,55	432,59	429,47
Amostra 4	427,13	430,36	432,79	431,85	431,59
Massa após 24 horas (gramas)					
Amostra 1	429,19	432,5	434,3	434,95	432,4
Amostra 2	427,88	428,78	431,03	437,56	434,72
Amostra 3	422,66	432,32	432,6	434,41	431,38
Amostra 4	429,12	432,32	434,82	433,8	433,43
Massa após 48 horas (gramas)					
Amostra 1	430,5	433,91	435,72	436,28	433,78
Amostra 2	429,25	430,3	432,5	438,97	436,02
Amostra 3	424,11	433,75	434,04	435,71	432,72
Amostra 4	430,59	433,69	436,23	435,19	434,69
Massa após 72 horas (gramas)					
Amostra 1	431,41	434,89	436,7	437,25	434,67
Amostra 2	430,2	431,23	433,53	440,01	436,87
Amostra 3	425,15	434,7	435,05	436,61	433,61
Amostra 4	431,61	434,65	437,24	436,12	435,46

## ANEXO D

Os dados do ensaio de resistividade elétrica para cada composição na idade de 7 dias estão apresentados nas Tabelas 43, 44, 45, 46 e 47.

Tabela 43 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 7 dias.

REF	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
CP1	295,00	291,00	291,00	285,00	290,50	19,01	1901,32
CP2	277,00	285,00	290,00	290,00	285,50	18,69	1868,59
CP3	274,00	281,00	282,00	268,00	276,25	18,08	1808,05
CP4	282,00	287,00	288,00	281,00	284,50	18,62	1862,05
CP5	293,00	296,00	293,00	292,00	293,50	19,21	1920,95
CP6	293,00	292,00	293,00	297,00	293,75	19,23	1922,59
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						18,81	1880,59
<b>Desvio padrão</b>						0,44	43,75
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,33	

Tabela 44 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 7 dias.

10% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
CP1	286,00	292,00	298,00	285,00	290,25	19,00	1899,68
CP2	297,00	295,00	296,00	296,00	296,00	19,37	1937,32
CP3	304,00	305,00	301,00	304,00	303,50	19,86	1986,40
CP4	295,00	292,00	292,00	292,00	292,75	19,16	1916,04
CP5	290,00	288,00	285,00	287,00	287,50	18,82	1881,68
CP6	300,00	297,00	298,00	300,00	298,75	19,55	1955,31
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						19,29	1929,41
<b>Desvio padrão</b>						0,38	38,27
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,98	

Tabela 45 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 7 dias.

20% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
<b>CP1</b>	276,00	283,00	282,00	279,00	280,00	18,33	1832,60
<b>CP2</b>	291,00	295,00	295,00	298,00	294,75	19,29	1929,13
<b>CP3</b>	293,00	290,00	293,00	295,00	292,75	19,16	1916,04
<b>CP4</b>	282,00	289,00	286,00	282,00	284,75	18,64	1863,68
<b>CP5</b>	286,00	289,00	282,00	282,00	284,75	18,64	1863,68
<b>CP6</b>	297,00	297,00	299,00	297,00	297,50	19,47	1947,13
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						18,92	1892,05
<b>Desvio padrão</b>						0,45	45,01
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,38	

Tabela 46 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 7 dias.

30% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
<b>CP1</b>	292,00	291,00	292,00	283,00	289,50	18,95	1894,77
<b>CP2</b>	289,00	292,00	282,00	288,00	287,75	18,83	1883,32
<b>CP3</b>	280,00	280,00	282,00	282,00	281,00	18,39	1839,14
<b>CP4</b>	289,00	283,00	280,00	281,00	283,25	18,54	1853,87
<b>CP5</b>	290,00	293,00	298,00	295,00	294,00	19,24	1924,23
<b>CP6</b>	284,00	276,00	288,00	280,00	282,00	18,46	1845,69
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						18,74	1873,50
<b>Desvio padrão</b>						0,33	33,05
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,76	

Tabela 47 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 7 dias.

40% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
<b>CP1</b>	289,00	288,00	287,00	281,00	286,25	18,74	1873,50
<b>CP2</b>	293,00	294,00	302,00	297,00	296,50	19,41	1940,59
<b>CP3</b>	297,00	296,00	300,00	302,00	298,75	19,55	1955,31
<b>CP4</b>	278,00	278,00	275,00	277,00	277,00	18,13	1812,96
<b>CP5</b>	292,00	292,00	289,00	283,00	289,00	18,92	1891,50
<b>CP6</b>	280,00	282,00	278,00	277,00	279,25	18,28	1827,69
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						18,84	1883,59
<b>Desvio padrão</b>						0,58	57,74
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						3,07	

Os dados do ensaio de resistividade elétrica para cada composição na idade de 28 dias estão apresentados nas Tabelas 48, 49, 50, 51 e 52.

Tabela 48 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 28 dias.

REF	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
<b>CP1</b>	370,00	361,00	362,00	363,00	364,00	23,82	2382,37
<b>CP2</b>	361,00	355,00	362,00	373,00	362,75	23,74	2374,19
<b>CP3</b>	345,00	352,00	355,00	330,00	345,50	22,61	2261,29
<b>CP4</b>	352,00	356,00	348,00	349,00	351,25	22,99	2298,93
<b>CP5</b>	353,00	360,00	358,00	357,00	357,00	23,37	2336,56
<b>CP6</b>	364,00	356,00	359,00	362,00	360,25	23,58	2357,83
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						23,35	2335,20
<b>Desvio padrão</b>						0,47	46,99
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,01	

Tabela 49 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 28 dias.

10% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	365,00	363,00	365,00	358,00	362,75	23,74	2374,19
CP2	358,00	367,00	364,00	363,00	363,00	23,76	2375,83
CP3	374,00	375,00	369,00	371,00	372,25	24,36	2436,37
CP4	364,00	352,00	358,00	354,00	357,00	23,37	2336,56
CP5	362,00	357,00	355,00	353,00	356,75	23,35	2334,92
CP6	363,00	356,00	356,00	360,00	358,75	23,48	2348,01
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						23,68	2367,65
<b>Desvio padrão</b>						0,38	38,09
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,61	

Tabela 50 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 28 dias.

20% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	346,00	353,00	354,00	349,00	350,50	22,94	2294,02
CP2	362,00	368,00	365,00	359,00	363,50	23,79	2379,10
CP3	360,00	357,00	361,00	365,00	360,75	23,61	2361,10
CP4	347,00	359,00	353,00	349,00	352,00	23,04	2303,83
CP5	353,00	347,00	343,00	343,00	346,50	22,68	2267,84
CP6	361,00	358,00	365,00	359,00	360,75	23,61	2361,10
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						23,28	2327,83
<b>Desvio padrão</b>						0,45	45,08
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,94	

Tabela 51 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 28 dias.

30% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
CP1	361,00	359,00	360,00	344,00	356,00	23,30	2330,01
CP2	359,00	357,00	350,00	354,00	355,00	23,23	2323,47
CP3	344,00	345,00	346,00	348,00	345,75	22,63	2262,93
CP4	352,00	344,00	343,00	341,00	345,00	22,58	2258,02
CP5	362,00	358,00	363,00	365,00	362,00	23,69	2369,28
CP6	355,00	344,00	359,00	350,00	352,00	23,04	2303,83
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						23,08	2307,93
<b>Desvio padrão</b>						0,42	42,49
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,84	

Tabela 52 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 28 dias.

40% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$
CP1	364,00	357,00	359,00	353,00	358,25	23,45	2344,74
CP2	370,00	374,00	380,00	374,00	374,50	24,51	2451,10
CP3	375,00	372,00	378,00	379,00	376,00	24,61	2460,91
CP4	350,00	350,00	349,00	350,00	349,75	22,89	2289,11
CP5	363,00	365,00	363,00	359,00	362,50	23,73	2372,56
CP6	349,00	354,00	350,00	349,00	350,50	22,94	2294,02
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						23,69	2368,74
<b>Desvio padrão</b>						0,75	74,56
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						3,15	

Os dados do ensaio de resistividade elétrica para cada composição na idade de 91 dias estão apresentados nas Tabelas 53, 54, 55, 56 e 57.

Tabela 53 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 91 dias.

REF	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	372,00	381,00	388,00	383,00	381,00	24,94	2493,64
CP2	366,00	354,00	365,00	386,00	367,75	24,07	2406,92
CP3	348,00	363,00	360,00	366,00	359,25	23,51	2351,29
CP4	370,00	370,00	356,00	367,00	365,75	23,94	2393,83
CP5	367,00	373,00	369,00	369,00	369,50	24,18	2418,37
CP6	377,00	368,00	370,00	376,00	372,75	24,40	2439,64
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						24,17	2417,28
<b>Desvio padrão</b>						0,48	47,63
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,97	

Tabela 54 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 91 dias.

10% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	392,00	390,00	384,00	385,00	387,75	25,38	2537,82
CP2	382,00	387,00	392,00	389,00	387,50	25,36	2536,18
CP3	397,00	400,00	389,00	400,00	396,50	25,95	2595,09
CP4	387,00	386,00	386,00	386,00	386,25	25,28	2528,00
CP5	389,00	385,00	384,00	383,00	385,25	25,21	2521,46
CP6	394,00	396,00	395,00	392,00	394,25	25,80	2580,36
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						25,50	2549,82
<b>Desvio padrão</b>						0,30	30,31
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,19	

Tabela 55 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 91 dias.

20% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
<b>CP1</b>	394,00	402,00	399,00	392,00	396,75	25,97	2596,72
<b>CP2</b>	417,00	420,00	414,00	416,00	416,75	27,28	2727,62
<b>CP3</b>	408,00	402,00	415,00	410,00	408,75	26,75	2675,26
<b>CP4</b>	399,00	410,00	403,00	400,00	403,00	26,38	2637,63
<b>CP5</b>	397,00	398,00	396,00	400,00	397,75	26,03	2603,27
<b>CP6</b>	420,00	418,00	428,00	420,00	421,50	27,59	2758,71
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						26,67	2666,54
<b>Desvio padrão</b>						0,66	66,36
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,49	

Tabela 56 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 91 dias.

30% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
<b>CP1</b>	443,00	439,00	438,00	426,00	436,50	28,57	2856,89
<b>CP2</b>	427,00	431,00	426,00	432,00	429,00	28,08	2807,80
<b>CP3</b>	426,00	425,00	426,00	427,00	426,00	27,88	2788,16
<b>CP4</b>	418,00	436,00	422,00	423,00	424,75	27,80	2779,98
<b>CP5</b>	440,00	445,00	443,00	439,00	441,75	28,91	2891,25
<b>CP6</b>	436,00	422,00	444,00	428,00	432,50	28,31	2830,71
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						28,26	2825,80
<b>Desvio padrão</b>						0,43	42,69
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,51	

Tabela 57 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 91 dias.

40% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	462,00	466,00	468,00	455,00	462,75	30,29	3028,69
CP2	470,00	476,00	489,00	477,00	478,00	31,29	3128,50
CP3	491,00	476,00	487,00	491,00	486,25	31,82	3182,50
CP4	451,00	458,00	449,00	453,00	452,75	29,63	2963,24
CP5	478,00	473,00	470,00	465,00	471,50	30,86	3085,96
CP6	457,00	459,00	452,00	450,00	454,50	29,75	2974,70
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						30,61	3060,60
<b>Desvio padrão</b>						0,87	87,17
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,85	

Os dados do ensaio de resistividade elétrica para cada composição na idade de 365 dias estão apresentados nas Tabelas 58, 59, 60, 61, 62 e 63.

Tabela 58 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição REF na idade de 365 dias.

REF	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	536,00	530,00	532,00	521,00	529,75	34,67	3467,21
CP2	499,00	527,00	508,00	509,00	510,75	33,43	3342,85
CP3	530,00	529,00	514,00	524,00	524,25	34,31	3431,21
CP4	530,00	479,00	499,00	475,00	495,75	32,45	3244,68
CP5	542,00	536,00	530,00	521,00	532,25	34,84	3483,57
CP6	535,00	537,00	475,00	517,00	516,00	33,77	3377,21
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						33,91	3391,12
<b>Desvio padrão</b>						0,89	89,34
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,63	

Tabela 59 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 10% ACBC na idade de 365 dias.

10% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
<b>CP1</b>	583,00	575,00	575,00	572,00	576,25	37,72	3771,55
<b>CP2</b>	588,00	599,00	604,00	602,00	598,25	39,16	3915,54
<b>CP3</b>	622,00	614,00	603,00	618,00	614,25	40,20	4020,26
<b>CP4</b>	586,00	580,00	584,00	583,00	583,25	38,17	3817,36
<b>CP5</b>	586,00	582,00	581,00	575,00	581,00	38,03	3802,64
<b>CP6</b>	582,00	581,00	584,00	583,00	582,50	38,12	3812,45
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						38,57	3856,63
<b>Desvio padrão</b>						0,94	93,69
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,43	

Tabela 60 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 20% ACBC na idade de 365 dias.

20% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
<b>CP1</b>	631,00	650,00	640,00	632,00	638,25	41,77	4177,34
<b>CP2</b>	660,00	668,00	666,00	666,00	665,00	43,52	4352,41
<b>CP3</b>	662,00	653,00	669,00	667,00	662,75	43,38	4337,69
<b>CP4</b>	624,00	652,00	645,00	631,00	638,00	41,76	4175,70
<b>CP5</b>	633,00	636,00	615,00	616,00	625,00	40,91	4090,62
<b>CP6</b>	655,00	655,00	664,00	654,00	657,00	43,00	4300,05
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						42,39	4238,97
<b>Desvio padrão</b>						1,06	105,98
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						2,50	

Tabela 61 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 30% ACBC na idade de 365 dias.

30% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	737,00	726,00	732,00	691,00	721,50	47,22	4722,21
CP2	718,00	719,00	712,00	722,00	717,75	46,98	4697,66
CP3	702,00	699,00	702,00	711,00	703,50	46,04	4604,40
CP4	729,00	712,00	709,00	706,00	714,00	46,73	4673,12
CP5	731,00	739,00	739,00	734,00	735,75	48,15	4815,47
CP6	732,00	691,00	722,00	703,00	712,00	46,60	4660,03
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						46,95	4695,48
<b>Desvio padrão</b>						0,71	70,95
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						1,51	

Tabela 62 – Dados do ensaio de resistividade elétrica para a composição 40% ACBC na idade de 365 dias.

40% ACBC	Resistência ( $\Omega$ )					Resistividade elétrica	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot cm$
CP1	822,00	797,00	809,00	783,00	802,75	52,54	5253,99
CP2	849,00	820,00	838,00	841,00	837,00	54,78	5478,15
CP3	868,00	835,00	853,00	866,00	855,50	55,99	5599,23
CP4	798,00	809,00	784,00	784,00	793,75	51,95	5195,08
CP5	841,00	832,00	794,00	794,00	815,25	53,36	5335,80
CP6	797,00	744,00	793,00	743,00	769,25	50,35	5034,73
<b>Valor médio de Resistividade elétrica</b>						53,16	5316,16
<b>Desvio padrão</b>						2,02	202,23
<b>Coefficiente de variação (%)</b>						3,80	