

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

**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**

**Fernando do Couto Rosa Almeida**

São Carlos  
2013

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

**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**

**Fernando do Couto Rosa Almeida**

Dissertação 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 Mestre em Estruturas e Construção Civil.

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos

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

**Co-Orientadora:** Profa. Dra. Lucia Helena Mascaro

São Carlos  
2013

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

A447ap

Almeida, Fernando do Couto Rosa.

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 / Fernando do Couto Rosa Almeida. -- São Carlos : UFSCar, 2013.

206 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Construção civil. 2. Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 3. Corrosão - armaduras. 4. Concreto com resíduo agroindustrial. I. Título.

CDD: 690 (20<sup>a</sup>)



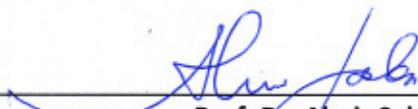
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil  
Rod. Washington Luís, Km 235  
13565-905 – São Carlos – SP  
Fone: (16) 3351-8261 Fax (16) 3351-8262  
e-mail: [ppgeciv@ufscar.br](mailto:ppgeciv@ufscar.br) site: [www.ppgeciv.ufscar.br](http://www.ppgeciv.ufscar.br)

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETOS COM  
SUSSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO PELA AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA  
CANA-DE-ACÚCAR – ACBC**

**FERNANDO DO COUTO ROSA ALMEIDA**

**Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em vinte e cinco de janeiro de 2013.**

**Banca Examinadora constituída pelos membros:**



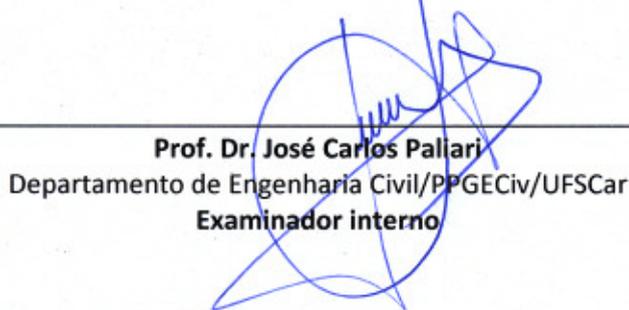
---

**Prof. Dr. Almir Sales**  
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar  
**Orientador**



---

**Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro**  
Departamento de Engenharia Civil, MEAU/Universidade Federal da Bahia  
**Examinador externo**



---

**Prof. Dr. José Carlos Paliari**  
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar  
**Examinador interno**

Aos meus pais,  
com todo amor que possa existir...

## AGRADECIMENTOS

---

A Deus, infinitamente, pela oportunidade deste trabalho e de todas as outras colocadas em meu caminho. Obrigado por reger minha vida, me fazendo seguir na melhor direção.

À minha família, meu porto seguro. Sem a oração, o carinho e o apoio de vocês, este trabalho não seria possível. Em especial, aos meus pais pelo amor e confiança incondicional. À Lela, ao Flavinho e ao Ju pela torcida e alegria.

Ao professor Almir, pela amizade, confiança, incentivo e apoio às minhas decisões. Obrigado por indicar o caminho sempre que foi preciso, com muita eficiência e solidez. Agradeço pela constante e incansável busca de suporte para realização da pesquisa.

À professora Lúcia, pela co-orientação deste trabalho. Obrigado pelas sugestões, contribuições e apoio nos experimentos realizados.

Aos amigos de pesquisa que foram indispensáveis no desenvolvimento deste estudo. Em especial, à Sofia, à Juliana e ao Paulão. Não só pelas valorosas discussões e auxílio na realização dos ensaios, mas também pela grande amizade. Estendo também meus agradecimentos aos colegas do Laboratório de Materiais e Componentes: Murilo, José Matheus, Letícia e Mariana.

Aos amigos sempre presentes que me ajudaram e acreditaram no meu esforço. À Jeh pela psicologia mais engenhoca no auxílio à realização dos ensaios de laboratório. Ao Fernando e ao Lucas pelo companheirismo e apoio ao trabalho, seja na análise de difratometria ou na formatação do computador. Ao Luís e ao Matheus pelo incentivo e discussões sobre rumo de vida. Aos amigos ISAC's pela torcida e compreensão, em especial, à Lu e à Nandinha. Obrigado por, simplesmente, poder contar com vocês.

Aos amigos do PPGE Civ, de modo especial àqueles que eu tive a oportunidade de ter mais contato, Carol, Thiago, Felipe e Camila.

Aos professores José Carlos Paliari, Celso Martins e Daniel Ribeiro pelas contribuições oferecidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (LIEC-UFSCar), pelo suporte na realização das técnicas eletroquímicas.

Ao Grupo de Materiais Eletroquímicos e Métodos Eletroanalíticos (GMEME-IQSQ-USP) pela viabilização das análises de microscopia óptica, particularmente ao professor Sérgio Spinola, à Vivian e ao Daniel.

Ao técnico José Luiz, do Laboratório de Propriedades Mecânicas de Metais (DEMA-UFSCar) no apoio à realização do ensaio mecânico das barras de aço.

Ao técnico Ricardo, do Laboratório de Sistemas Estruturais (DECiv-UFSCar) no apoio à realização da ruptura dos corpos de prova.

Ao técnico Paulo, do Laboratório de Construção Civil (IAUSQ-USP) no apoio à realização dos ensaios mecânicos dos concretos e argamassas.

Ao engenheiro Leandro Garcia, da Cimento Tupi S.A., pelas informações fornecidas.

À Prefeitura Municipal de São Carlos, por parte do secretário municipal José Jairo de Sáles, pela permissão para a realização do Mestrado. Ao apoio dos amigos da Secretaria Municipal de Obras Públicas, em modo especial aos engenheiros Mário, Marcos e Rosely.

Ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGECiv), da Universidade Federal de São Carlos, pelo suporte e apoio no desenvolvimento do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa no início do Mestrado.

E a todos aqueles que puderam contribuir para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

“Há pessoas que desejam saber só por saber, e isso é curiosidade; outras, para alcançarem fama, e isso é vaidade; outras, para enriquecerem com a sua ciência, e isso é um negócio torpe; outras, para serem edificadas, e isso é prudência; outras, para edificarem os outros, e isso é amor.”

(São Tomás de Aquino)

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.** 2013. 206f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o principal exportador de seus derivados (açúcar, álcool, energia etc.). Um dos principais resíduos gerados no processo industrial do setor sucroalcooleiro é a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), derivada da queima do bagaço da cana nas caldeiras para a produção de energia elétrica (cogeração) para o abastecimento das próprias usinas. Esse material, com elevada quantidade de sílica, é geralmente descartado no solo como adubo nas lavouras de cana-de-açúcar, mesmo sendo pobre em nutrientes. Essa pesquisa vem oferecer uma alternativa para aplicação da ACBC em matrizes cimentícias de concretos como agregado miúdo, em substituição à areia natural. Além disso, a durabilidade de concretos utilizando materiais alternativos demanda uma atenção especial, principalmente quanto à corrosão de armaduras. Esta é uma das principais preocupações na utilização de resíduos quanto à degradação de estruturas de concreto. O processo corrosivo se inicia quando ocorre a despassivação da armadura e se propaga na presença de um meio propício. Este trabalho busca, portanto, estudar e avaliar a potencialidade da ocorrência de corrosão de armaduras em concretos produzidos com a ACBC em substituição parcial ao agregado miúdo. As amostras de areia de cinza foram coletadas em usina do Estado de São Paulo, e padronizadas através de um peneiramento manual e moagem. A ACBC utilizada foi caracterizada quanto a sua composição química, granulometria, material pulverulento, massas específica e unitária e absorção. Foram produzidos argamassas e concretos com teores de substituição de 0% (referência), 30% e 50% de ACBC. Nas argamassas, foram realizados testes de resistência à compressão, porosidade (índice de vazios e análise dos poros por microscopia óptica), absorção de água, carbonatação acelerada, penetração de cloretos e condutividade elétrica da solução aquosa dos poros. Os concretos foram submetidos a ensaios de resistência mecânica, índice de vazios, absorção, penetração de cloretos, potencial e taxa de corrosão das armaduras. Desta forma, os resultados indicaram que a substituição em 30% e 50% de areia natural pela ACBC pode aumentar a resistência à compressão dos concretos e a resistência ao ataque de cloretos, e diminuir a probabilidade de despassivação da armadura. Entretanto, com o teor de 50% de ACBC, a taxa de corrosão foi significativamente maior em relação às demais amostras e manteve-se similar entre o concreto com 30% de ACBC e o de referência. Com isso, foi possível concluir que os concretos com 30% de substituição ao agregado miúdo convencional pela ACBC podem ser aplicados em elementos estruturais sem perda de desempenho mecânico e de durabilidade.

**Palavras-chave:** areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), corrosão de armaduras, concreto com resíduo agroindustrial.

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.** 2013. 206f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

Brazil is the world's largest producer of sugarcane and the leading exporter of its derivatives (sugar, alcohol, energy etc.). One of the main waste generated in the manufacturing process of this sector is the sugarcane bagasse ash sand (SBAS), produced from the burning of bagasse into boilers to produce electricity (cogeneration). This ash sand is composed of a high amount of silica and it is also currently discarded in cane plantations as organic fertilizer, despite the fact that it is poor in nutrients. This research proposes to provide an alternative application of SBAS in concrete as a replacement material for fine aggregate. Furthermore, the durability of concrete with alternative materials demands a special attention, especially regarding reinforcement corrosion. This is a major concern of the use of wastes on the degradation of concrete structures. The process begins with the despassivation of steel reinforcement, and it propagates in a suitable environment. The aim of this study was to evaluate the potential occurrence of reinforcement corrosion in concrete made with SBAS as a partial replacement material for fine aggregate. The ash sand samples were collected in a plant in the State of São Paulo, and standardized through a sieving and grinding. The SBAS was subjected to physical and chemical characterization, by its chemical composition, sieve analysis, powdery material, absorption, bulk density and true density. Mortars and concretes were produced with levels of substitution of 0% (reference), 30% and 50% of SBAS. In mortars, tests of compressive strength, porosity (void index and pores analysis by optical microscopy), water absorption, accelerated carbonation, chloride penetration and electrical conductivity of the aqueous solution were performed. The concretes were submitted to tests of compressive strength, void index, absorption, chloride penetration, potential and rate of reinforcement corrosion. Thus, the results indicated that substitution of 30% and 50% by SBAS can increase the compressive strength of concrete and the resistance to attack by chlorides, and decrease the despassivation probability of reinforcement. However, with the content of 50% of SBAS, the corrosion rate was significantly higher in comparison to other samples, and it was similar between the concretes with 30% of SBAS and reference. Thus, it was possible to conclude that the concrete with 30% of SBAS as a substitute of fine aggregate may be applied in conventional structural elements without loss of mechanical and durability performance.

**Key-words:** sugarcane bagasse ash sand (SBAS), reinforcement corrosion, concrete with agroindustrial waste.

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Etapas do processamento industrial da cana-de-açúcar para produção do açúcar e etanol .....	27
Figura 2.2 – Produção de cana-de-açúcar no Brasil .....	29
Figura 2.3 – Evolução da produção de cana-de-açúcar e seus derivados (açúcar e etanol) no Brasil.....	30
Figura 2.4 – Uso destinado ao cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.....	30
Figura 2.5 – Área destinada ao cultivo da cana-de-açúcar nos principais estados da região Centro-sul, safra 2009/10.....	31
Figura 2.6 – Esquema global do processamento da cana-de-açúcar e a geração dos principais resíduos .....	32
Figura 2.7 – Armazenamento do resíduo do bagaço da cana-de-açúcar .....	34
Figura 2.8 – Difração de raios X das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar lavado e não lavado .....	37
Figura 2.9 – Bagaço da cana-de-açúcar (a) e diferentes colorações de areia de cinza residual gerada após a queima do bagaço em caldeira (b, c, d).....	38
Figura 3.1 – Tipos de corrosão e fatores que os provocam.....	45
Figura 3.2 – Etapas de um processo de corrosão de uma armadura .....	46
Figura 3.3 – Esquema tridimensional da relação entre carbonatação, resistência à compressão e porosidade em concretos.....	48
Figura 3.4 – Perfil típico de um revestimento de concentração de cloretos ao longo do revestimento em um concreto contaminado.....	52
Figura 3.5 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado.....	55
Figura 3.6 – Representação do aumento de volume sólido dos produtos de corrosão.....	56
Figura 3.7 – Esquema para medida de potencial de corrosão .....	58
Figura 3.8 – Diagrama de Pourbaix: potencial x pH, para o sistema Fe-H <sub>2</sub> O a 25°C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade .....	59
Figura 3.9 – Dispositivo básico para determinação das curvas de polarização em meio aquoso .....	62
Figura 3.10 – Curvas de polarização potenciodinâmica, traçadas em escala logarítmica e linear, respectivamente .....	62
Figura 4.1 – Organograma dos procedimentos experimentais .....	65
Figura 4.2 – Coleta da ACBC na usina .....	69
Figura 4.3 – Preparo da ACBC: (a) peneiramento e (b) moagem .....	70
Figura 4.4 – Antes e depois da padronização da ACBC, respectivamente.....	71
Figura 4.5 – Peneiramento da ACBC e pesagem das amostras retidas nas peneira .....	72
Figura 4.6 – Comparação entre as águas de lavagem e ACBC lavada e seca .....	73
Figura 4.7 – Ensaio para determinação da massa específica da ACBC .....	74
Figura 4.8 – Determinação da massa unitária da ACBC no estado seco e solto.....	75
Figura 4.9 – ACBC no estado saturado com superfície seca .....	76
Figura 4.10 – Ensaio de granulometria da pedra britada.....	77
Figura 4.11 – Ensaio de tração das barras de aço CA-60.....	78
Figura 4.12 – Determinação do índice de consistência das argamassas .....	80
Figura 4.13 – Moldagem dos corpos de prova de argamassas .....	81

Figura 4.14 – Ensaio de resistência à compressão das argamassas .....	81
Figura 4.15 – Equipamento utilizado para a microscopia óptica dos poros .....	83
Figura 4.16 – Ensaio de carbonatação acelerada: (a) câmara de carbonatação, (b) sensor de CO <sub>2</sub> , e (c) termo-higrômetro .....	85
Figura 4.17 – Corpos de prova de argamassa em período de sazonalidade e condicionados ao ensaio de carbonatação, respectivamente .....	87
Figura 4.18 – Ruptura diametral do corpo de prova e tratamento da superfície rompida com solução de fenolftaleína, respectivamente .....	87
Figura 4.19 – Secagem e imersão em solução salina de NaCl dos corpos de prova de argamassa, respectivamente .....	89
Figura 4.20 – Tratamento com solução de AgNO <sub>3</sub> das amostras saturadas em solução de NaCl – difícil visualização da frente de penetração de cloretos .....	89
Figura 4.21 – Aspersão de solução de nitrato de prata e fluoresceína .....	90
Figura 4.22 – Representação esquemática do método colorimétrico .....	91
Figura 4.23 – Exemplo de amostra com tratamento de solução de AgNO <sub>3</sub> e fluoresceína ...	91
Figura 4.24 – Preparação da solução aquosa da argamassa e medição da condutividade elétrica, respectivamente .....	92
Figura 4.25 – Moldes cilíndricos e prismáticos utilizados na concretagem.....	94
Figura 4.26 – Amassamento do concreto.....	94
Figura 4.27 – Ensaio de abatimento do tronco de cone .....	95
Figura 4.28 – Moldagem dos corpos de prova: (a) cilíndricos e (b) prismáticos .....	96
Figura 4.29 – Corpos de prova de concreto cilíndricos e prismáticos.....	96
Figura 4.30 – Ensaio de resistência à compressão axial do concreto .....	97
Figura 4.31 – Ensaio de módulo de elasticidade do concreto .....	98
Figura 4.32 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A.....	98
Figura 4.33 – Ensaio de tração por compressão diametral do concreto .....	99
Figura 4.34 – Ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica do concreto.....	100
Figura 4.35 – Limpeza das barras de aço com solução de ácido clorídrico e hexametilenotetramina (início e fim do processo, respectivamente).....	102
Figura 4.36 – Liberação do gás H <sub>2</sub> durante o procedimento de limpeza das barras.....	102
Figura 4.37 – Continuação do processo de limpeza: (a) escovação, (b) imersão em acetona, (c) secagem, e (d) barras limpas.....	103
Figura 4.38 – Delimitação das barras de aço .....	104
Figura 4.39 – Representação esquemática do corpo de prova de concreto armado.....	105
Figura 4.40 – Montagem das formas metálicas.....	105
Figura 4.41 – Conexão dos fios de cobre para contato elétrico.....	106
Figura 4.42 – Semiciclos de secagem e umedecimento, respectivamente.....	108
Figura 4.43 – Formação de AgCl por eletrólise .....	109
Figura 4.44 – Eletrodo de referência de Ag/AgCl/KCl <sub>sat</sub> .....	110
Figura 4.45 – Leitura do potencial de corrosão da barra A.....	111
Figura 4.46 – Potenciostato em funcionamento e gaiola de Faraday contendo o sistema de medição, respectivamente .....	113
Figura 5.1 – Difractometria da amostra de ACBC coletada na Usina Diamante.....	118
Figura 5.2 – Curvas granulométricas da ACBC e composição do agregado miúdo .....	120
Figura 5.3 – Curva granulométrica da areia natural .....	122

Figura 5.4 – Curva granulométrica da pedra britada .....	123
Figura 5.5 – Diagrama tensão-deformação para as barras CA-60 .....	125
Figura 5.6 – Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias .....	126
Figura 5.7 – Resultados da massa específica das argamassas.....	128
Figura 5.8 – Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas.....	130
Figura 5.9 – Resultados do ensaio de índice de vazios das argamassas.....	132
Figura 5.10 – Diâmetro médio dos poros das argamassas .....	134
Figura 5.11 – Análise dos poros das argamassas pela microscopia óptica.....	136
Figura 5.12 – Distribuição normal das medidas de diâmetro dos poros das argamassas obtidos por microscopia óptica.....	137
Figura 5.13 – Representação esquemática dos poros das argamassas .....	138
Figura 5.14 – Possível preenchimento dos poros da argamassa pela ACBC.....	139
Figura 5.15 – Análise da profundidade de carbonatação nas argamassas .....	140
Figura 5.16 – Tendência de evolução das profundidades de carbonatação.....	141
Figura 5.17 – Análise da penetração de cloretos nas argamassas .....	143
Figura 5.18 – Tendência de evolução da penetração de cloretos nas argamassas .....	144
Figura 5.19 – Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros das argamassas.....	146
Figura 5.20 – Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias .....	148
Figura 5.21 – Resistência à compressão dos concretos aos 168 dias .....	150
Figura 5.22 – Resistência à compressão dos concretos aos 28 e 168 dias .....	152
Figura 5.23 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos.....	153
Figura 5.24 – Módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias .....	154
Figura 5.25 – Resultados da massa específica dos concretos.....	156
Figura 5.26 – Resultados de absorção de água dos concretos.....	157
Figura 5.27 – Resultados de índice de vazios dos concretos.....	158
Figura 5.28 – Evolução dos potenciais de corrosão das barras dos corpos de prova de concreto.....	160
Figura 5.29 – Variação da massa dos corpos de prova de concreto ao longo dos ciclos de envelhecimento.....	164
Figura 5.30 – Curvas de polarização das armaduras nos concretos (escala linear).....	167
Figura 5.31 – Curvas de polarização das armaduras (escala logarítmica) .....	168
Figura 5.32 – Perda de massa devido à corrosão das armaduras (amostras C50) .....	170
Figura 5.33 – Visualização da frente de penetração de cloretos nos concretos .....	171
Figura 5.34 – Resultados da frente de penetração de cloretos nos concretos .....	172

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 – Composição química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	36
Tabela 4.1 – Propriedades físicas e químicas do cimento Portland CP II E 32 .....	66
Tabela 4.2 – Relação dos materiais utilizada para cada traço de argamassa .....	80
Tabela 4.3 – Relação de materiais (em massa) utilizada para cada traço de concreto .....	93
Tabela 4.4 – Índice de consistência dos concretos .....	95
Tabela 4.5 – Limites de potencial para as respectivas probabilidades de corrosão .....	111
Tabela 4.6 – Critérios de avaliação da velocidade de corrosão .....	114
Tabela 5.1 – Composição química da ACBC (em %).....	117
Tabela 5.2 – Granulometria da ACBC.....	119
Tabela 5.3 – Granulometria da composição do agregado miúdo (areia + ACBC) .....	120
Tabela 5.4 – Caracterização da ACBC .....	121
Tabela 5.5 – Granulometria da areia natural.....	121
Tabela 5.6 – Caracterização da areia natural .....	122
Tabela 5.7 – Granulometria da pedra britada.....	123
Tabela 5.8 – Caracterização da pedra britada .....	124
Tabela 5.9 – Caracterização do aço CA-60 .....	124
Tabela 5.10 – Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.....	125
Tabela 5.11 – Análise de variâncias do ensaio de resistência à compressão .....	126
Tabela 5.12 – Resultados do ensaio de massa específica das argamassas.....	127
Tabela 5.13 – ANOVA para a massa específica das argamassas .....	128
Tabela 5.14 – Teste de Tukey para massa específica das argamassas .....	129
Tabela 5.15 – Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas.....	129
Tabela 5.16 – ANOVA para a absorção das argamassas .....	130
Tabela 5.17 – Teste de Tukey para absorção das argamassas .....	130
Tabela 5.18 – Resultados do ensaio de índice de vazios das argamassas.....	131
Tabela 5.19 – ANOVA para o índice de vazios das argamassas .....	132
Tabela 5.20 – Teste de Tukey para o índice de vazios das argamassas .....	132
Tabela 5.21 – Diâmetro médio dos poros das argamassas.....	133
Tabela 5.22 – ANOVA para o diâmetro médio dos poros das argamassas.....	134
Tabela 5.23 – Teste de homoscedasticidade para o diâmetro médio dos poros .....	135
Tabela 5.24 – Teste de Tukey para o diâmetro médio dos poros das argamassas.....	135
Tabela 5.25 – Profundidade de carbonatação nas argamassas.....	141
Tabela 5.26 – Resultados do Teste de T para as profundidades de carbonatação .....	142
Tabela 5.27 – Profundidade de penetração de cloretos nas argamassas .....	144
Tabela 5.28 – Resultados do Teste de Tukey para as médias das frentes de penetração de cloretos nas argamassas .....	144
Tabela 5.29 – Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros das argamassas .....	146
Tabela 5.30 – Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias .....	147
Tabela 5.31 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias .....	148
Tabela 5.32 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos.....	149
Tabela 5.33 – Resistência à compressão dos concretos aos 168 dias .....	150

Tabela 5.34 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos aos 168 dias .....	151
Tabela 5.35 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos.....	151
Tabela 5.36 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos .....	153
Tabela 5.37 – ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral .....	153
Tabela 5.38 – Módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias.....	154
Tabela 5.39 – ANOVA para o módulo de elasticidade dos concretos .....	155
Tabela 5.40 – Resultados do ensaio de massa específica dos concretos.....	156
Tabela 5.41 – ANOVA para massa específica dos concretos .....	156
Tabela 5.42 – Resultados do ensaio de absorção de água dos concretos.....	157
Tabela 5.43 – ANOVA para absorção de água dos concretos .....	157
Tabela 5.44 – Resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos.....	158
Tabela 5.45 – ANOVA para índice de vazios dos concretos .....	158
Tabela 5.46 – ANOVA para a amplitude das medidas de potencial de corrosão.....	163
Tabela 5.47 – Potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) das amostras corroídas .....	166
Tabela 5.48 – Resultados das taxas de corrosão das armaduras nos concretos .....	169
Tabela 5.49 – Resultados da espessura de penetração de cloretos dos concretos .....	171
Tabela 5.50 – ANOVA para as medidas da frente de penetração de cloretos.....	172
Tabela 5.51 – Teste de Tukey para a frente de penetração de cloretos.....	173
Tabela A.1 – Medidas Ecorr - CR-1 .....	198
Tabela A.2 – Medidas Ecorr - CR-2 .....	199
Tabela A.3 – Medidas Ecorr - CR-3 .....	200
Tabela A.4 – Medidas Ecorr – C30-1 .....	201
Tabela A.5 – Medidas Ecorr – C30-2.....	202
Tabela A.6 – Medidas Ecorr – C30-3.....	203
Tabela A.7 – Medidas Ecorr – C50-1 .....	204
Tabela A.8 – Medidas Ecorr – C50-2.....	205
Tabela A.9 – Medidas Ecorr – C50-3.....	206

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	-	Relação água/cimento
ACBC	-	Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar
Ag	-	Prata
AgNO <sub>3</sub>	-	Nitrato de prata
AgCl	-	Cloreto de prata
ANOVA	-	Análise de variância
AR	-	Argamassa referência (0% de substituição de CBC)
A30	-	Argamassa com 30% de substituição de CBC
A50	-	Argamassa com 50% de substituição de CBC
CaCO <sub>3</sub>	-	Carbonato de cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	-	Hidróxido de cálcio
CBC	-	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
CH	-	Hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> )
Cl <sup>-</sup>	-	Íon cloreto
CR	-	Concreto referência (0% de substituição de CBC)
C-S-H	-	Silicato de cálcio hidratado
CV	-	Coefficiente de variação
C30	-	Concreto com 30% de substituição de CBC
C50	-	Concreto com 50% de substituição de CBC
ddp	-	Diferença de potencial
E <sub>corr</sub>	-	Potencial de corrosão
I <sub>corr</sub>	-	Corrente de corrosão instantânea
i <sub>corr</sub>	-	Velocidade ou taxa de corrosão
η	-	Sobrepotencial ou sobretensão

KCl	-	Cloreto de potássio
KCl <sub>sat</sub>	-	Cloreto de potássio saturado
NaCl	-	Cloreto de sódio
NBR	-	Norma brasileira
NM	-	Norma Mercosul
PC	-	Profundidade de carbonatação
PCA	-	Potencial de circuito aberto
pH	-	Potencial de hidrogênio
PIB	-	Produto interno bruto
PPC	-	Profundidade de penetração de cloretos
Teste T	-	Teste de Tukey

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 Justificativa.....	20
1.1.1 Impactos científicos e tecnológicos.....	20
1.1.2 Impacto ambiental .....	22
1.1.3 Impactos sociais e econômicos .....	22
1.2 Questões de pesquisa.....	23
1.3 Objetivos .....	24
1.4 Estrutura do trabalho .....	24
<b>2. AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR</b> .....	<b>26</b>
2.1 Cana-de-açúcar e seus derivados .....	26
2.2 Os resíduos da cana-de-açúcar .....	32
2.3 Potencialidades da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	39
<b>3. AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETOS</b> .....	<b>43</b>
3.1 Considerações iniciais.....	43
3.2 Carbonatação.....	46
3.3 Penetração de cloretos.....	50
3.4 Desenvolvimento do processo eletroquímico .....	54
3.5 Técnicas eletroquímicas de avaliação da corrosão .....	56
3.5.1 Técnica de potenciais de corrosão .....	57
3.5.2 Técnica de curvas de polarização.....	60
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>64</b>
4.1 Materiais.....	66
4.1.1 Cimento Portland composto.....	66
4.1.2 Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	67
4.1.3 Areia natural .....	67
4.1.4 Pedra britada .....	67
4.1.5 Aço CA-60 .....	67
4.1.6 Eletrodo de referência .....	67
4.1.7 Reagentes para soluções .....	68
4.1.8 Água.....	68
4.2 Métodos .....	68
4.2.1 Coleta e padronização da ACBC .....	69
4.2.2 Caracterização dos materiais.....	71
4.2.3 Moldagem e cura das argamassas .....	79
4.2.4 Ensaio de resistência à compressão das argamassas .....	81
4.2.5 Propriedades físicas das argamassas .....	82
4.2.6 Microscopia óptica dos poros da argamassa .....	83
4.2.7 Ensaio de carbonatação acelerada.....	83
4.2.8 Ensaio de penetração de cloretos em argamassas.....	88
4.2.9 Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros .....	92

4.2.10	Moldagem e cura dos concretos .....	93
4.2.11	Propriedades mecânicas dos concretos .....	96
4.2.12	Propriedades físicas dos concretos .....	99
4.2.13	Avaliação da corrosão dos concretos por meio de técnicas eletroquímicas .....	100
4.2.14	Ensaio de penetração de cloretos em concretos.....	115
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>117</b>
5.1	Caracterização dos materiais .....	117
5.1.1	Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	117
5.1.2	Areia natural .....	121
5.1.3	Pedra britada .....	122
5.1.4	Aço CA-60 .....	124
5.2	Resistência à compressão das argamassas.....	125
5.3	Propriedades físicas das argamassas .....	127
5.4	Profundidade de carbonatação nas argamassas.....	139
5.5	Penetração de cloretos nas argamassas.....	143
5.6	Condutividade elétrica da solução aquosa da argamassa .....	145
5.7	Resistência mecânica dos concretos.....	147
5.8	Propriedades físicas dos concretos .....	155
5.9	Potencial de corrosão dos concretos.....	159
5.10	Taxa de corrosão das armaduras .....	165
5.11	Penetração de cloretos nos concretos.....	171
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>175</b>
6.1	Conclusões .....	177
6.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	177
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>179</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>197</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Considerando o grande potencial de aplicação dos materiais no setor da construção civil, este trabalho foi motivado pela possibilidade do emprego da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) em produtos para a construção, visando a sua aplicação em concretos, com foco na avaliação do potencial de corrosão de armaduras.

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, o qual ocupa a posição de liderança mundial na produção de cana e de seus derivados. Do seu processo industrial, obtêm-se o açúcar e suas derivações, o álcool anidro e hidratado, o vinhoto, a levedura e o bagaço da cana. O bagaço, por sua vez, é queimado nas caldeiras para cogeração de energia elétrica nas usinas, gerando a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, problema enfrentado pelos administradores das usinas no que diz respeito à disposição final desse resíduo (MANHÃES, 1999; FIESP/CIESP, 2001; CORDEIRO, 2006; UNICA, 2007; PRÓ-ÁLCOOL, 2009).

No entanto, essa situação pode ser contornada por meio de soluções tecnológicas. A indústria da Construção Civil apresenta-se com um grande potencial para a diminuição de problemas dessa natureza, pela viabilidade que apresenta por meio da incorporação de resíduos nos materiais de construção (ROCHA & CHERIAF, 2003).

Pelos resultados preliminares, outros pesquisadores (KREUS et al., 2002; AL-RAWAS, 2005; BAI et al., 2005; CYR & LUDMANN, 2006; ANDRADE et al., 2007; MARTINS et al., 2007; RAJAMANE, 2007; entre outros) atestaram a viabilidade do uso das cinzas em substituição parcial ou total ao agregado miúdo em matrizes cimentícias.

Além disso, deve-se considerar o uso de tecnologias alternativas para agregados naturais, com melhores desempenhos ambiental, social, econômico e tecnológico. Uma vez que a construção civil consome grandes quantidades de recursos naturais, vários estudos estão sendo realizados nesse setor (JOHN, 1997; HERNÁNDEZ, 1998; JOHN, 2007), objetivando a substituição de matérias-primas (cimento e agregados) por resíduos industriais e urbanos.

Entretanto, a aplicação de materiais alternativos em concretos e argamassas demanda uma atenção especial em relação à sua durabilidade. Neste contexto, o efeito da corrosão de armaduras apresenta-se como uma das principais preocupações na utilização de resíduos agroindustriais quanto à degradação de estruturas de concreto.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

O interesse na realização desta pesquisa foi justificado pela possibilidade de contribuição no âmbito científico, tecnológico, social, econômico e ambiental, no sentido de comprovar a necessidade de estudos que contribuam para o aprimoramento da tecnologia e aplicação de resíduos de origem agroindustrial na produção de artefatos de concreto para a construção civil.

Em estudos recentes, Madurwar et al. (2013) verificaram os benefícios da aplicação de resíduos agroindustriais em materiais de construção. A reciclagem desses resíduos oferece uma alternativa de uso de materiais sustentáveis para a construção civil, viabilizando uma solução para o problema da poluição e descarte, além de conservar jazidas naturais para futuras gerações. Somado a isso, várias propriedades físicas e mecânicas desses materiais de construção foram melhoradas com a incorporação dos resíduos agroindustriais. Para mais, os produtos ecologicamente corretos podem ser relativamente mais baratos e mais duráveis. Logo, o uso de resíduos agroindustriais pode ser uma prática considerável para o desenvolvimento de componentes substitutos para os materiais de construção tradicionais.

### **1.1.1 IMPACTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS**

Com a aplicação de resíduos desta natureza como materiais de construção, foi possível a investigação de novas soluções tecnológicas pertinentes a concretos confeccionados com resíduos, principalmente em relação ao estudo microestrutural, físico-químico e mecânico de matrizes cimentícias.

Além disso, com base no estudo de diversos pesquisadores, o presente trabalho propôs uma diferenciação da nomenclatura das cinzas residuais provenientes do bagaço da cana-de-açúcar, quanto à sua forma de obtenção e tipo de aplicação. Desta forma, foram propostos os seguintes nomes: CBC (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) obtido a partir de processos específicos para uso como material pozolânico; e ACBC (areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar) obtidos diretamente das usinas para uso como material inerte.

Alguns autores já estudaram a adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em matrizes cimentícias, como concretos, argamassas, cerâmica vermelha, solo-cimento etc. Em princípio, qualquer cinza, de origem industrial ou vegetal, predominantemente siliciosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada, pode ser utilizada como adição mineral (JOHN et al., 2003).

Payá et al. (2002), Valenciano (2004), Cordeiro et al. (2008), Cordeiro et al. (2009), Paula et al. (2009), Souto et al. (2009), Rukson & Chindaprasirt (2011), entre outros, investigaram a CBC como substituto ao cimento Portland em argamassas e concreto. Macedo (2009) verificou a durabilidade das argamassas e Bandala et al. (2011) analisaram a corrosão de armaduras em concretos, ambos também com a mesma linha de pesquisa de utilizar a CBC como substituto ao cimento Portland.

Segundo Lima et al. (2011), a utilização da areia de cinzas como material pozolânico ou hidráulico requer procedimentos específicos de moagem e queima do bagaço que podem levar à inviabilidade econômica, devido à pouca reatividade da maior parte delas. Neste sentido, outros pesquisadores (MARTINS & ZANELLA, 2009; MARTINS & MACHADO 2009; LIMA et al. 2009; SALES & LIMA, 2010) utilizaram a ACBC como material de carga ou inerte, substituindo o agregado miúdo natural. Apesar de outro tipo de aplicação, esses autores ainda utilizaram a mesma nomenclatura de CBC para se referir ao resíduo da ACBC.

Contudo, poucos são os estudos que apresentam uma análise da durabilidade de concretos utilizando a ACBC como agregado miúdo, destacando os trabalhos de Lima et al. (2011), Almeida et al. (2011) e Sarmento & Vanderlei (2011). Até o momento, nenhuma pesquisa foi direcionada ao estudo da durabilidade de concreto, com utilização da ACBC como agregado miúdo, com foco no potencial de corrosão de armaduras. Apesar de terem utilizado outros tipos de resíduos para a análise, essa temática foi verificada em outros trabalhos (ROSA, 2005; CHOI et al., 2006; RIBEIRO, 2010; HORSAKULTHAI et al., 2011; SHI et al., 2011; CEZAR, 2011).

Por isso, é importante salientar que para uma efetiva contribuição e transferência tecnológica torna-se imprescindível a produção de conhecimento científico pertinente a novos materiais para uso na construção civil, que vão desde os aspectos microestruturais até os relacionados à durabilidade e a interação com outros materiais convencionais.

O presente trabalho, pois, apresentou-se em caráter inovador por propor um estudo do potencial de corrosão das armaduras em concretos produzidos com ACBC como agregado miúdo, contribuindo para o avanço científico e tecnológico das áreas relacionadas.

Além disso, ele vem propor uma diferenciação da nomenclatura do resíduo quanto à sua obtenção e forma de aplicação.

### **1.1.2 IMPACTO AMBIENTAL**

A deficiência na gestão e planejamento para a disposição dos resíduos têm se transformado em grave problema urbano e ambiental, levando a um gerenciamento oneroso e complexo das cidades, cuja preocupação tem se tornado cada vez mais relevante, especialmente, em países em desenvolvimento. A escassez de áreas de deposição de resíduos causada pela ocupação e valorização de áreas urbanas, os altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental são alguns desses problemas (JOHN, 2003; MADURWAR et al., 2013). Uma prática para a construção com baixo impacto para o meio ambiente que fomente o crescimento das cidades apresenta-se com uma tendência que vem se consolidando como importante prática de sustentabilidade (PEREIRA, 2003; PHILIPPI & AGUIAR, 2005).

Além disso, a exploração de areia a partir da extração em leito de rios e outros ambientes de sedimentação causam sérios impactos sobre o meio ambiente. Atualmente, 90% de toda a produção nacional de areia natural tem sido realizada em leito de rios. O impacto causado por essa atividade é devido à retirada da cobertura vegetal nas áreas a serem lavradas, causando assoreamento nos rios e, conseqüentemente, a degradação do curso d'água. Deste modo, esta atividade extrativa tem sido cada vez mais coibida pelos órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente (LUZ & ALMEIDA, 2012).

Com a utilização da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo buscou-se diminuir o uso de areia natural retirada dos rios, e também reduzir o volume de resíduos destinados a aterros sanitários controlados. Dessa forma, a infraestrutura das cidades pode garantir a manutenção dos serviços à população sem causar mais impactos ambientais com seu crescimento.

### **1.1.3 IMPACTOS SOCIAIS E ECONÔMICOS**

O esgotamento de áreas próximas aos grandes mercados consumidores e a restrição ambiental têm resultado no deslocamento das mineradoras para locais cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos, onerando o preço final da areia natural. Isso se deve ao fato de que, na maioria dos casos, a distância entre o produtor e o consumidor tem sido, em média, de 100 km, aumentando o custo do frete e, conseqüentemente, o preço final do produto (LUZ & ALMEIDA, 2012).

O Brasil é o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro, sendo esse setor o responsável por 3,65% do PIB, exercendo a liderança em todos os segmentos (cana-de-açúcar, açúcar e álcool) e gerando empregos diretos e indiretos, principalmente ligados ao corte manual da cana. No entanto, segundo o Jornal da Ciência (2007), essa atividade será extinta em 2017 no Estado de São Paulo, dando lugar à colheita mecanizada. Esse é o prazo final firmado entre usineiros e a Secretaria de Estado do Meio Ambiente em protocolo assinado em maio de 2007, antecipando o limite anterior (2031), que havia sido imposto por Lei Estadual criada para eliminar gradativamente as queimadas de cana, necessárias para viabilizar o corte manual.

Se por um lado a extinção das queimadas resolve um problema ambiental, por outro leva a um enorme contingente de desempregados, que podem não ser totalmente absorvidos por outros setores. A proposição de um novo valor agregado à areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) gera a expectativa de novos postos de trabalho e a criação de um novo nicho econômico para os subprodutos da indústria sucroalcooleira brasileira.

Salienta-se que as medidas ambientais que estão sendo adotadas conjuntamente com a Política Nacional de Biocombustíveis (REVISTA PESQUISA FAPESP, 2007) só tende a aumentar a quantidade de resíduos provenientes da cana-de-açúcar e, nesse contexto, o presente estudo representa uma importante contribuição em termos sociais e econômicos.

Justifica-se, por meio dos impactos apresentados, a viabilidade da substituição da areia natural por areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concretos. Esta incorporação do resíduo visa uma melhora no desempenho das propriedades do concreto e uma diminuição do custo em relação aos materiais tradicionais.

## **1.2 QUESTÕES DE PESQUISA**

Com base no breve cenário apresentado, foram elaboradas as seguintes questões que se buscou investigar:

- Em termos de durabilidade, com foco no potencial de corrosão da armadura, como o concreto se comporta com a substituição da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar pelo agregado miúdo convencional?
- Com quais teores é possível substituir parcialmente o agregado miúdo convencional pela areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar sem perda de desempenho de durabilidade do concreto?

- Quais as possíveis aplicações deste concreto utilizando a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, considerando a potencialidade de corrosão das armaduras?

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho foi estudar e 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 natural.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudar e avaliar a profundidade de carbonatação acelerada e a penetração de cloretos de argamassas com diferentes teores de ACBC em substituição parcial ao agregado miúdo natural;
- Estudar e avaliar a porosidade entre diferentes teores de ACBC em concretos e argamassas com substituição parcial ao agregado miúdo natural;
- Estudar e avaliar o potencial de corrosão da armadura em função do tempo de envelhecimento entre diferentes teores de ACBC em concretos com substituição parcial ao agregado miúdo natural;
- Propor possíveis aplicações para o concreto armado utilizando ACBC como substituto parcial do agregado miúdo natural, comparativamente a um concreto convencional.

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Além deste capítulo introdutório, o presente trabalho é composto por mais cinco capítulos, os quais foram descritos, brevemente, como segue:

No Capítulo 2, foi elaborada uma revisão da literatura sobre a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Neste capítulo, buscou-se apresentar a situação atual da cana-de-açúcar no país e seu processamento, com enfoque na geração do resíduo da ACBC e suas potencialidades.

No Capítulo 3, apresentou-se um estudo sobre a corrosão de armaduras em concretos. Neste estudo, foram destacadas as fases de iniciação e de propagação do

processo corrosivo de uma estrutura de concreto armado, bem como uma breve apresentação da medida de potencial de corrosão.

No Capítulo 4, foram apresentados os materiais e métodos utilizados na fase experimental da pesquisa. Os procedimentos foram propostos a fim de caracterizar os materiais, bem como analisar as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade das argamassas e concretos produzidos com e sem ACBC.

No Capítulo 5, foram apresentados os resultados e discussões sobre os ensaios realizados, buscando avaliar a potencialidade da ocorrência de corrosão de armaduras em concretos produzidos com a ACBC em substituição parcial à areia natural.

Por fim, no Capítulo 6, foram apresentadas as considerações finais do trabalho, buscando propor, a partir das análises realizadas, as possíveis aplicações para o concreto armado utilizando ACBC como substituto parcial do agregado miúdo natural.

Nos itens seguintes, foram apresentadas as referências bibliográficas citadas ao longo do trabalho, bem como o apêndice.

## 2. AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão da literatura sobre a cana-de-açúcar e seus derivados, com enfoque para o resíduo da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) e suas potencialidades de utilização.

### 2.1 CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS DERIVADOS

A cana-de-açúcar é uma planta considerada nativa das regiões tropicais, sendo que sua origem se deu nas ilhas do Arquipélago da Polinésia e Nova Guiné (CESNIK & MIOCQUE, 2004).

No Brasil, as primeiras mudas foram introduzidas por Martim Afonso de Souza, em 1502, provenientes da Ilha da Madeira (CORRÊA, 1926; COSTA, 1958; apud CESNIK & MIOCQUE, 2004). Inicialmente, a cultura foi desenvolvida no litoral nordestino devido às características do solo e fatores climáticos, além da proximidade de Portugal que favorecia seu potencial exportador (NARITOMI, 2007). O primeiro engenho do Brasil foi oficialmente fundado na capitania de São Vicente, em 1532.

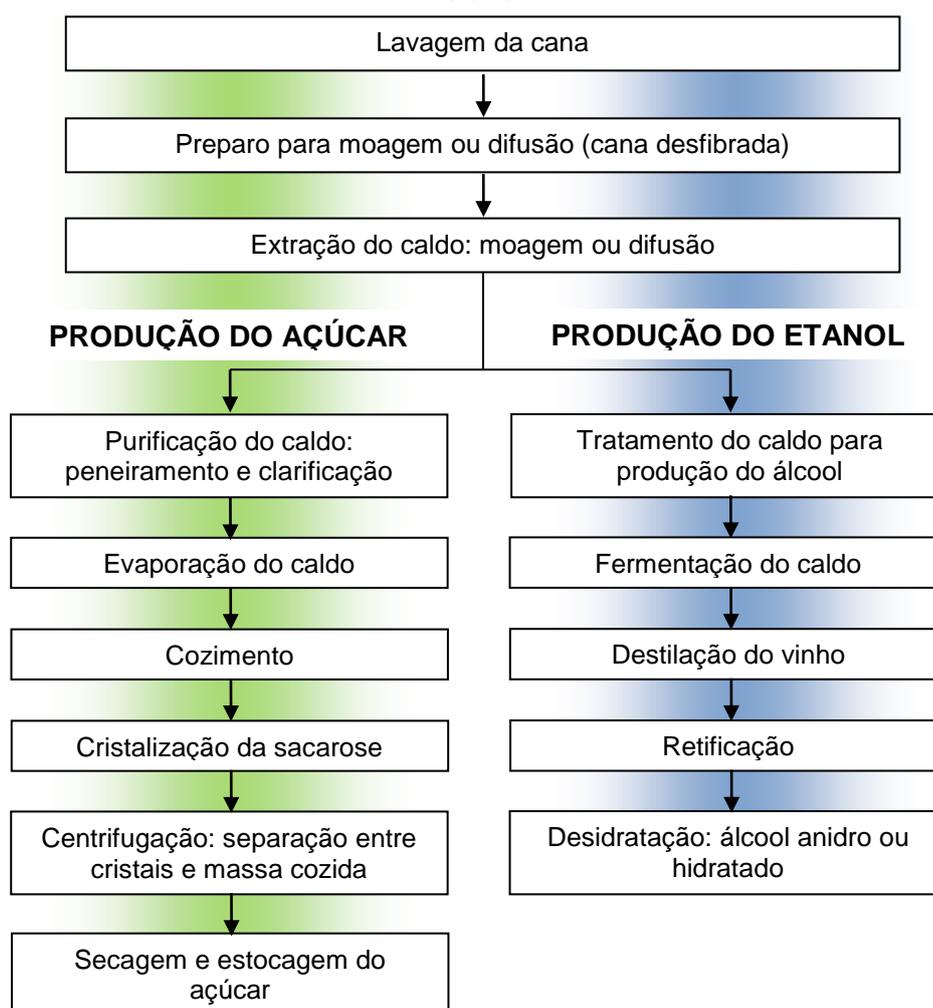
Classificada como gênero *Saccharum* (CALVINO, 1925 apud CESNIK & MIOCQUE, 2004), a cana-de-açúcar é uma gramínea que possui, quando amadurecida, um grande teor de açúcares, com cerca de um terço da matéria seca dos colmos. A cultura da cana é semiperene, ou seja, pode ser cortada e colhida sem a necessidade de replantio, por cinco a sete safras (cinco a sete anos). Depois desse período, o plantio pode ser alternado com outro tipo de cultura no terreno (UNICA, 2007).

A cana é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, sendo que, do seu processo industrial, obtém-se o açúcar e suas derivações (açúcar demerara, açúcar VHP – *very high polarized* –, açúcar cristal e açúcar refinado), o álcool anidro e hidratado (diferenciados pelo teor de água contida no etanol, 0,5% e 5%, respectivamente, e que podem ser destinados ao uso carburante, de perfumarias, de bebidas e para a alcoolquímica). Além disso, obtém-se, também, no processamento da cana, o vinhoto, a levedura de cana e o

bagaço. A partir de 2005, a venda de energia elétrica pelas usinas passou a ser outro produto gerado a partir dessa cultura (FIESP/CIESP, 2001; UNICA, 2007).

Na Figura 2.1 foi apresentada, resumidamente, a diferenciação das etapas do processo industrial para produção do açúcar e etanol, a partir do processamento da cana-de-açúcar.

**Figura 2.1 – Etapas do processamento industrial da cana-de-açúcar para produção do açúcar e etanol**



(Fonte: adaptado de Agência Embrapa, 2010b)

Em usinas com produção mista (açúcar e álcool), depois da cana ser lavada, a planta passa por três moendas. O produto da primeira moagem vai para a produção de açúcar, sendo chamada de “moagem de primeira linha”. No segundo e terceiro processo, o que é produzido é levado para a produção de álcool combustível (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009).

Herrera (2000) também cita o uso da cana-de-açúcar para a geração de diversos produtos usados em indústrias químicas, farmacêuticas e de alimentos. Segundo dados da UNICA (2007), apenas um terço da produção do açúcar brasileiro é vendido no mercado interno, sendo que metade destina-se ao consumo direto e a outra metade ao mercado industrial (refrigerantes, balas, sorvetes etc.). Já para o etanol, 80% da produção brasileira destina-se ao uso carburante, 5% ao uso alimentar, perfumaria e alcoolquímica e 15% para exportação.

O uso do etanol para produção de bebidas se difere apenas nas etapas a partir de destilação. A cachaça (também conhecida como pinga, caninha, cana ou aguardente de cana) pode ser produzida em destilarias industriais ou em alambiques artesanais. No primeiro, os processos são controlados por empresas e a cana-de-açúcar é cultivada em grandes áreas; no segundo, a bebida é produzida em pequena escala por pequenos produtores, em sua maioria, utilizando mão de obra familiar. A aguardente de cana é a terceira bebida destilada mais consumida no mundo e a primeira no Brasil (AGÊNCIA EMPRAPA, 2010a).

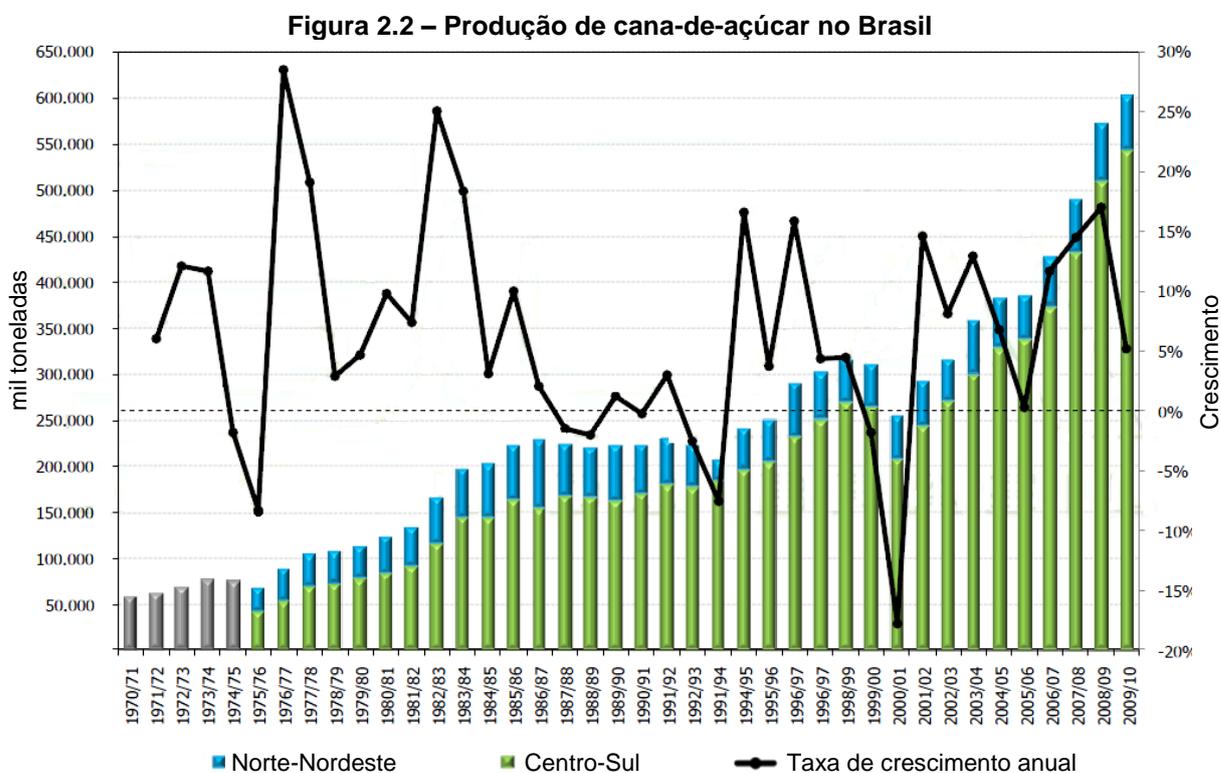
Macedo (2007) menciona outros produtos que a indústria da cana já é capaz de gerar regularmente, como a L-lisina (um tipo de aminoácido protéico), MSG (glutamato monossódico, o qual estimula o gosto umami do paladar), extratos de levedura, ácido cítrico e sorbitol e, em fase de pré-comercial, o PHB (polihidroxibutirato) para a fabricação de vasos, colheres e sacolas plásticas, dentre outras aplicações. Também produtos derivados de alcoolquímica, incluindo borracha sintética, vêm sendo avaliados, em particular, polietileno, utilizando eteno resultante da desidratação do etanol.

O setor sucroquímico da cana é responsável por movimentar boa parte dos negócios farmacêuticos, através da produção de aminoácidos, vitaminas e antibióticos; de alimentos, com a produção de aminoácidos e aditivos diversos; e na indústria química, produzindo enzimas e ácidos orgânicos (FIESP/CIESP, 2001).

A produção mundial de cana-de-açúcar totaliza quase 1,5 bilhão de toneladas e está concentrada predominantemente na faixa tropical do planeta, nos países em desenvolvimento da América Latina, África e sudeste asiático (UNICA, 2010).

O Brasil atua neste cenário como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o principal exportador de seus derivados (açúcar e etanol), seguido da Índia, Tailândia e Austrália, e possui como vantagem, a safra em dois períodos distintos: a safra da região nordeste é colhida no período de setembro a março e, da região centro-sul, de abril a novembro. Com isso, o Brasil alimenta o mercado interno e externo com a produção do açúcar e álcool durante o ano todo (CANA, 2007; UNICA, 2010).

A evolução da produção da cana-de-açúcar no Brasil, entre as safras de 1970/71 até a safra de 2009/10, pode ser verificada na Figura 2.2, destacando as produções do Norte-Nordeste e Centro-Sul do país.

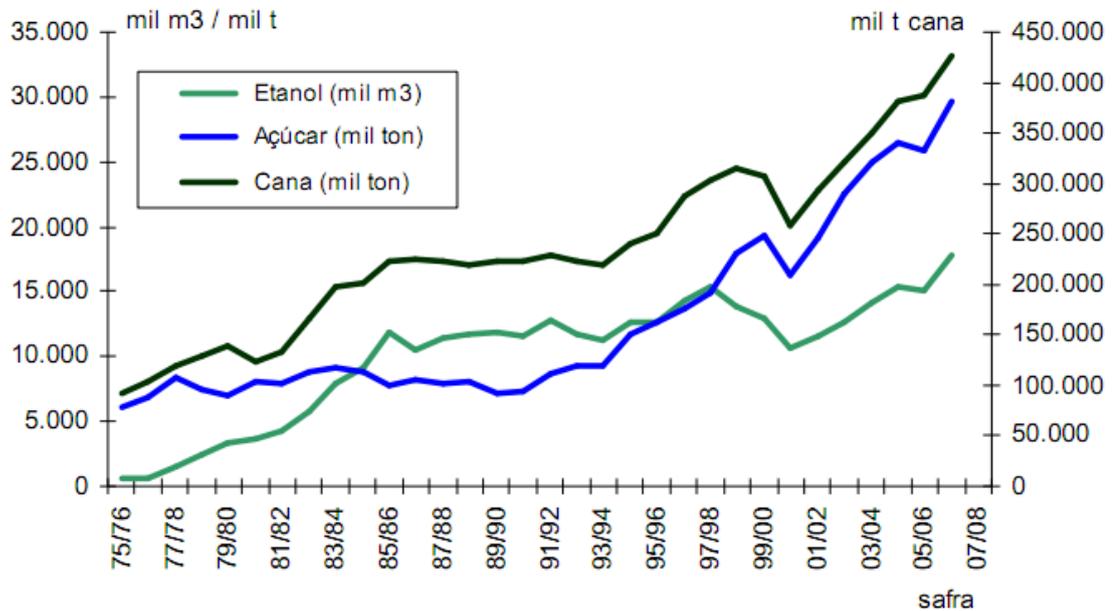


(Fonte: SCA Etanol do Brasil, 2012)

A produção da cana e seus derivados apresentam contínuo e notório crescimento. Apenas para a safra 2012/13 foi estimado um processamento de 602,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Deste total, 49,8% serão destinados à produção de açúcar e, 50,2% para produção de etanol, representando um quantitativo de 38,9 milhões de toneladas de açúcar e 24,0 bilhões de litros de álcool (CONAB, 2012).

A evolução da produção da cana-de-açúcar e dos seus principais derivados (açúcar e etanol) foi apresentada na Figura 2.3, ao longo das safras até 2008. Nesta representação é possível verificar o contínuo crescimento da indústria sucroalcooleira no país.

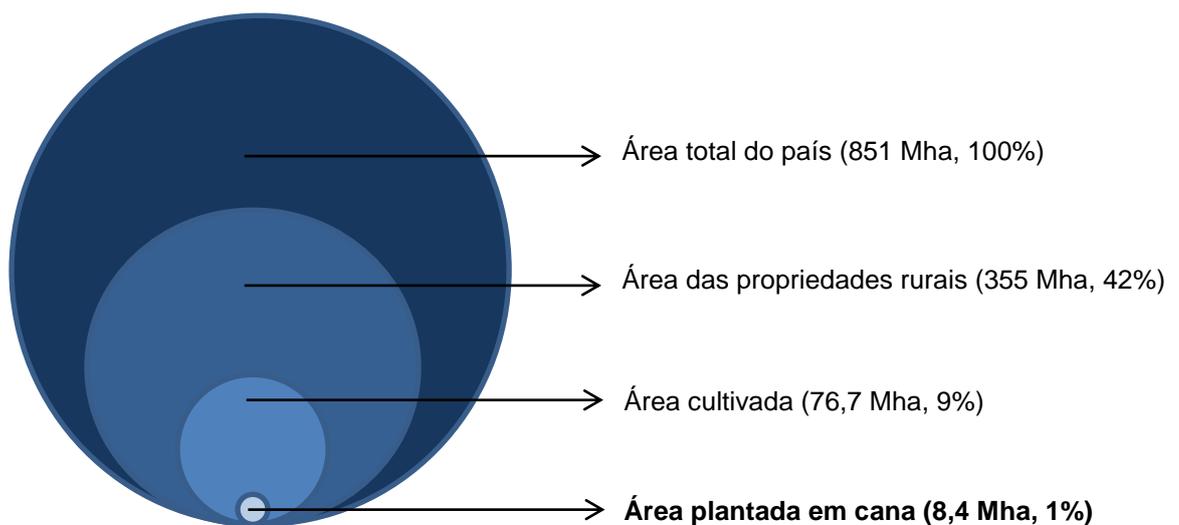
**Figura 2.3 – Evolução da produção de cana-de-açúcar e seus derivados (açúcar e etanol) no Brasil**



(Fonte: BNDES et al., 2008)

A cultura da cana-de-açúcar representa uma das principais atividades agrícolas e ocupa uma área plantada no país de cerca de 8,57 milhões de hectares, segundo estimativa do CONAB (2012) para a safra 2012/13. Mesmo assim, esse valor representa menos que 1% de todo o território nacional, como pode ser verificado na Figura 2.4.

**Figura 2.4 – Uso destinado ao cultivo da cana-de-açúcar no Brasil**



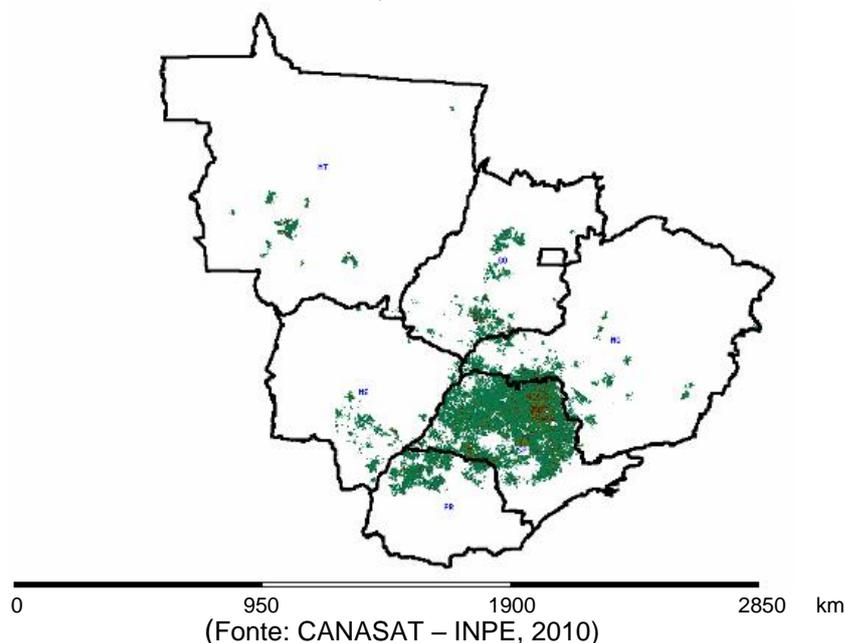
(Fonte: BNDES et al., 2008)

A cana-de-açúcar pode ser considerada a principal cultura da região Sudeste, devido à sua contribuição sobre o valor bruto da produção agrícola e sobre a área ocupada (52% da área plantada com cana estão no Estado de São Paulo, seguido de Minas Gerais com 9%, e Goiás com 8,5%). Do total de 293 usinas brasileiras (plantações de cana-de-açúcar associadas com a produção de açúcar e álcool), 227 são alocadas nas regiões Sudeste e Sul sendo 91 dentro do Estado de São Paulo (EMBRAPA, 2007).

Esse mesmo Estado abriga há 38 anos o Centro de Tecnologia Canaveira (CTC) – antigo Centro de Tecnologia Copersucar –, onde foi desenvolvida boa parte das variedades de cana plantadas no centro-sul do país. Mais recentemente tornou-se endereço do Pólo Nacional de Biocombustíveis, inaugurado em 2004, com o objetivo de coordenar esforços e definir estratégias para uso de diferentes fontes de biomassa (REVISTA PESQUISA FAPESP, 2007).

Na Figura 2.5 pode ser observada a área destinada ao cultivo da cana-de-açúcar nos principais Estados produtores da região Centro-sul do país, na safra de 2009/10.

**Figura 2.5 – Área destinada ao cultivo da cana-de-açúcar nos principais estados da região Centro-sul, safra 2009/10**



Nesta representação, obtida a partir de imagens de satélites de sensoriamento remoto, nota-se claramente a concentração da produção da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Segundo estimativa para a safra 2012/13 da CONAB (2012), apenas o Estado de São Paulo destinará cerca de 4,43 milhões de hectares para o cultivo de cana-de-açúcar.

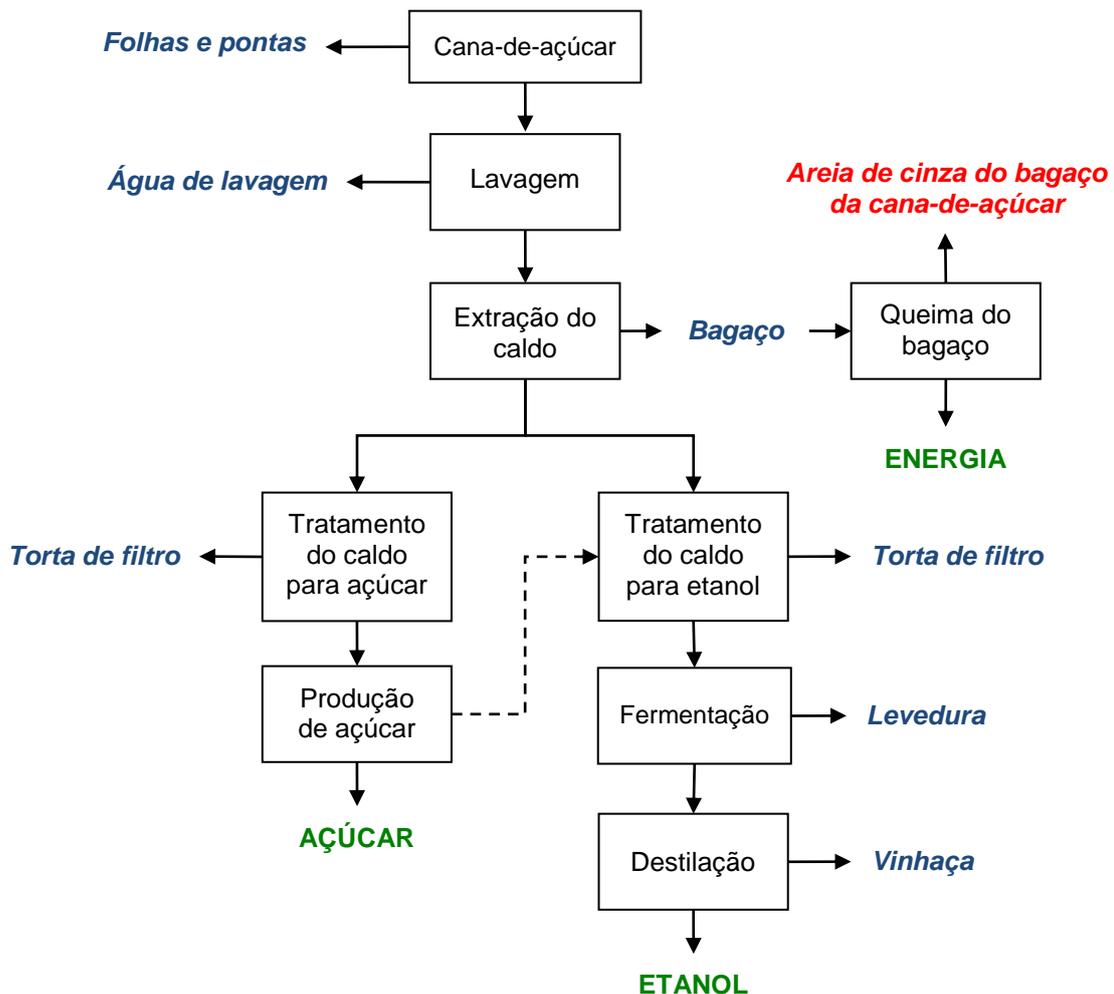
## 2.2 OS RESÍDUOS DA CANA-DE-AÇÚCAR

Como qualquer setor de produção industrial, o da cana-de-açúcar também gera consideráveis quantidades de resíduos que, se não forem aproveitados, representam desperdícios para o setor produtivo e oferecem riscos para o meio ambiente e sociedade.

De acordo com a Lei Federal 12.305 (2010), no Art. 3º inciso XVI, os resíduos sólidos são definidos como “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, nos estados sólido ou semissólido, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Na Figura 2.6 está esquematizado o processo simplificado de produção de açúcar, álcool, energia e seus principais resíduos gerados.

**Figura 2.6 – Esquema global do processamento da cana-de-açúcar e a geração dos principais resíduos**



(Fonte: adaptado de Cordeiro, 2006)

Para FIESP/CIESP (2001), os principais resíduos sólidos gerados no processo produtivo são a palhada (ou palha), o bagaço da cana, as cinzas ou areia de cinza da caldeira (queima do bagaço) e as embalagens de defensivos agrícolas ou agrotóxicos. Esses últimos devem ser destinados para estabelecimentos de recolhimento, os quais são responsáveis pela limpeza encaminhamento para reciclagem.

De acordo com Spadotto (2007), no processamento da cana, para produção de açúcar e álcool nas usinas e destilarias, são gerados cerca de 320 bilhões de litros de vinhaça, 88 milhões de toneladas de torta de filtro e 92 milhões de toneladas de bagaço.

De maneira mais abrangente, Jendiroba (2006) também quantifica os resíduos gerados na industrialização da cana-de-açúcar. Considerando uma tonelada de cana esmagada, se tem de 100 a 400 kg de torta de filtro, 800 a 1000 litros de vinhaça e 260 kg de bagaço. Além desses, outros resíduos como águas residuárias, óleo fusel e levedura também são gerados, mas em termos de quantidade e preocupação apresentam menor demanda.

Um dos efluentes líquidos gerados por esse processo é a água de lavagem da cana cujo valor é cerca de 8 m<sup>3</sup> de efluente por tonelada de cana moída. Essa água residuária pode ser reintroduzida no processo na forma de recirculação de água durante a lavagem ou até mesmo durante o cultivo da cana, na forma de irrigação (FIESP/CIESP, 2001).

A vinhaça (ou vinhoto) é o resíduo líquido gerado na fermentação da produção do álcool, sendo aproveitada na irrigação e fertilização das lavouras de cana-de-açúcar, como adição de materiais orgânicos e minerais exigidos pelo solo, já que esse subproduto é rico em potássio (HERRERA, 2000). Entretanto, seu uso deve ser controlado devido a possíveis problemas de degradação e contaminação do solo e da água (através de processos de lixiviação que atingirá o lençol freático), quando aplicado em excesso (SPADOTTO, 2007).

Conforme estabelecido na Portaria Minter nº 158, de 3 de novembro de 1980 e outras relacionadas, fica proibido o despejo de vinhoto, direto ou indireto, em qualquer coleção hídrica, pois esse material, altamente poluente com características ácidas, retira o oxigênio da água (FIESP/CIESP, 2001). Para cada litro de álcool, são produzidos até 12 litros de vinhaça. Todavia, já existem pesquisas que mostram que esse valor pode ser reduzido pela metade a partir do aumento do teor alcoólico dos tanques de fermentação (ESTADÃO, 2009).

Além disso, a torta de filtro, material orgânico sólido gerado na fabricação do açúcar, proveniente da clarificação do caldo e filtração, também é utilizada na adubação dos canaviais. Herrera (2000) sugere que a mistura da torta de filtro com os resíduos das colheitas possui aplicação como fertilizantes, através de processos de compostagem

relativamente simples. Neste caso, a cinza ou fuligem do bagaço de cana derivada dos fornos das usinas também é adicionada contribuindo para o incremento de fósforo e potássio ao solo. Em contrapartida, Manhães (1999) atestou que a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, além de ser de difícil degradação, possui poucos nutrientes.

Ramalho e Sobrinho (2001) estudaram o efeito da vinhaça e da torta de filtro no solo, quando aplicados em larga escala. O primeiro resíduo não alterou significativamente os teores de metais pesados. Já a torta de filtro, durante um período de 20 anos, concluiu-se que houve aumentos consideráveis nos teores totais de cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu) e níquel (Ni) estando, entretanto, esses metais em formas químicas pouco móveis e disponíveis para absorção pelas plantas.

Os resíduos da palha (folhas secas, folhas verdes e ponteiros) gerados no cultivo da cana-de-açúcar são de difícil quantificação pelo fato desses materiais serem, usualmente, queimados para facilitar a colheita da cana. Mesmo assim, FIESP/CIESP (2001) estimou um valor médio de 18,2 toneladas de palha seca por hectare de área plantada. Quando o processo é mecanizado, o resíduo é retirado sem queimar e, posteriormente, disposto no solo ajudando no processo de adubação do terreno, juntamente com o vinhoto.

O bagaço da cana-de-açúcar também representa uma quantidade considerável do resíduo gerado nesse processo industrial. Após processo de moagem da cana-de-açúcar, o mosto resultante, constituído pelo caldo de cana ou pelo melaço misturado com água, segue para as dornas de fermentação alcoólica, enquanto o resíduo de bagaço é armazenado na usina para ser reaproveitado no processo (Figura 2.7).

**Figura 2.7 – Armazenamento do resíduo do bagaço da cana-de-açúcar**



(Fonte: próprio autor)

Para cada tonelada de cana processada, sobram 260 quilos de bagaço. Sua quantificação depende, em geral, de diversos fatores como: estado de conservação de moendas, temperatura, eficiência do processo, sistema de colheita (mecanizada ou manual), altura de corte dos ponteiros, variedade, idade da cultura, estágio de corte, situação climática, entre outros (FIESP/CIESP, 2001; FAPESP, 2008).

Em estimativa feita pela FIESP/CIESP (2001) os resíduos de palha e bagaço correspondem a cerca de três vezes a geração dos resíduos domiciliares e industriais gerados, juntos, no Estado de São Paulo.

Basicamente, o bagaço é um resíduo sólido composto de lignina e celulose. *In natura*, ele é composto por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos insolúveis e 2 a 3% de sólidos solúveis em água. Quimicamente, com base na massa seca do bagaço, esse é constituído de 41% de celulose, 25% de hemicelulose e 20% de lignina (ZARDO et al., 2004).

O seu principal destino é a geração de energia elétrica nas unidades industriais através da sua queima, eliminando a necessidade de aquisição de eletricidade das distribuidoras (SPADOTTO, 2007). Segundo Herrera (2000) é possível obter índices superiores a 100 quilowatts-hora por tonelada de cana moída.

De acordo com UNICA (2004), atualmente, as usinas situadas no Estado de São Paulo são autossuficientes no consumo elétrico, pois usam o bagaço como principal insumo energético nos seus processos industriais. O bagaço é queimado em caldeiras, destinadas ao aquecimento de água, cujo vapor produzido movimentam as turbinas geradoras de energia. O autor ainda afirma que a quantidade disponível de biomassa do bagaço poderia ser capaz de gerar cerca de 13 mil megawatts de energia, cerca de 10% da capacidade total instalada no país. Segundo apresentado em Ethanol Statistics (2008), em 2015, esse valor poderia subir para 15% de toda a demanda elétrica instalada no país.

Além do uso para cogeração de energia elétrica, o bagaço da cana-de-açúcar também pode ser utilizado como obtenção de energia de biomassa, reforço de compósitos cimentícios, substituto à madeira em placas de aglomerado de baixa densidade, ração animal, além de ser reinserido no processo para produção de etanol de segunda geração. (FIESP/CIESP, 2001; FREIRE, 2003; AGOPYAN & SAVASTANO JR., 2003; HERRERA, 2000; PANDEY et al., 2000; FAPESP, 2008; MACEDO, 2007).

O foco da utilização do bagaço foi destinado, no presente trabalho, na sua queima para cogeração de energia elétrica nas usinas e destilarias, pois neste processo é gerada a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

O bagaço é calcinado em temperaturas por volta de 1000°C, gerando uma cinza pesada (areia de cinza) e uma cinza volante que, embora não sejam diretamente liberadas no ar, como encontrado nos processos de colheita, podem poluir o ambiente quando lançadas de maneira imprópria após a limpeza dos fornos (MARTINS et al., 2007).

O processo de queima do bagaço para a produção de energia libera uma quantidade substancial de carbono, na forma de CO<sub>2</sub>. Todavia, o balanço nas emissões de CO<sub>2</sub> é praticamente nulo, pois a biomassa queimada é reposta no ciclo seguinte da cultura da cana por meio da fotossíntese (CORDEIRO, 2006).

Em sua composição, Cordeiro (2006) afirma que a areia de cinza do bagaço apresenta uma grande quantidade de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), normalmente acima de 60% em massa. Martins & Zanella (2009) citaram que esse resíduo é constituído por, aproximadamente, 77% de areia de quartzo e pó de carvão.

Na Tabela 2.1 foi apresentada a composição química da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar estudada por vários autores em trabalhos recentes.

**Tabela 2.1 – Composição química da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

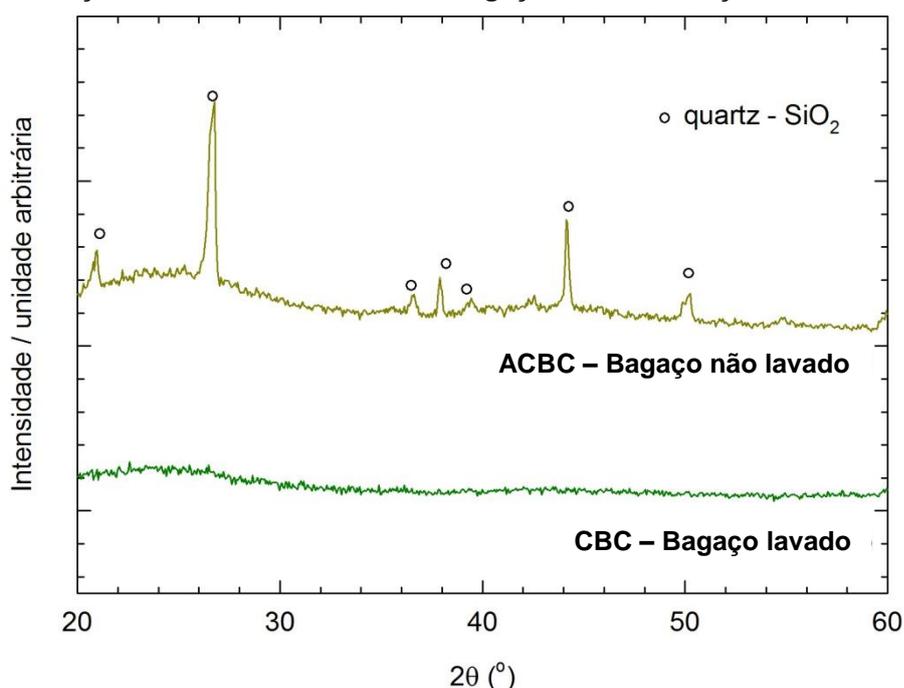
Composto	Quantidade (% em massa)			
	Cordeiro et al., 2009	Sales & Lima, 2010 <sup>(1)</sup>	Souza et al., 2011	Faria et al., 2012
SiO <sub>2</sub>	78,3	88,2	85,5	61,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,6	2,3	5,3	5,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6	5,1	1,3	7,4
TiO <sub>2</sub>	-	1,0	0,3	1,5
CaO	2,2	0,6	2,1	5,0
MgO	-	0,4	1,1	1,2
SO <sub>3</sub>	-	< 0,1	-	0,4
K <sub>2</sub> O	3,5	1,3	3,5	6,2
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,1	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,4	0,5	1,0
Perda ao fogo	0,42	0,35	-	9,8
Temperatura de calcinação do bagaço	700 - 900 °C	750 - 800 °C	-	-

<sup>(1)</sup> Amostras SBA-J coletadas na Usina Diamante (município de Jaú – SP)

Em todos os trabalhos analisados, a ACBC foi composta, predominantemente, por estrutura cristalina de quartzo (SiO<sub>2</sub>). As diferenças entre as composições químicas apresentadas pelos autores podem estar relacionadas a diferentes tipos de solos onde a cana-de-açúcar é cultivada, além de fatores como métodos de fertilização e gestão do solo (FARIA et al., 2012).

A grande quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente na composição da ACBC é proveniente da contaminação de areia do solo. Soares et al. (2012) apresentaram as difrações de raios X obtidas para as cinzas do bagaço lavado (CBC) e não lavado (ACBC) nas mesmas condições de queima, como pode ser verificado na Figura 2.8.

**Figura 2.8 – Difração de raios X das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar lavado e não lavado**



(Fonte: adaptado de Soares et al., 2012)

As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar lavado (cinza “pura”) apresentaram um difratograma difuso, com halo amorfo característico de materiais amorfos. Já as cinzas do bagaço não lavado (areias de cinza) apresentaram picos característicos de materiais cristalinos, confirmando a contaminação de quartzo na lavoura (SOARES et al., 2012). Desta forma, justifica-se o termo adotado neste presente trabalho para designação do resíduo utilizado como areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC).

Segundo Coelho (1999), a temperatura de queima do bagaço na usina pode variar de 850°C e 920°C com umidade de 50%. Para valores de umidade do bagaço abaixo de 35%, a temperatura de queima supera 1000°C.

Quanto maior a temperatura no interior do salão da caldeira e/ou do tempo de exposição ao calor, maior será a quantidade de carbono liberada, provocando uma diferenciação na coloração do resíduo. Areias de cinzas com tonalidades mais escuras indicam alto teor de carbono e, as mais claras, revelam que a combustão foi completa, como pode ser verificado na Figura 2.9 (CORDEIRO, 2006).

**Figura 2.9 – Bagaço da cana-de-açúcar (a) e diferentes colorações de areia de cinza residual gerada após a queima do bagaço em caldeira (b, c, d)**



(Fonte: Cordeiro, 2006)

A cor escura indica a presença de matéria orgânica na forma de carbono livre nas areias de cinzas, pois a umidade e os materiais voláteis já foram eliminados após a queima. Essa quantidade tem grande influência na absorção de água, pois o material carbonoso é extremamente fino, ocasionando um aumento na demanda de água quando utilizado em concretos e argamassas (MACEDO, 2009).

Para cada tonelada de cana processada são gerados cerca de 260 quilos (26%) de bagaço. De toda essa quantidade de bagaço, 95% são destinados para a queima em caldeiras, ficando apenas 5% para serem usados para outros fins. E ainda, a cada 250 quilos de bagaço queimado, são produzidos aproximadamente seis quilos de areia de cinza (FIESP/CIESP, 2001).

Considerando o levantamento realizado pela CONAB (2012), apenas para a safra de 2012/13 está prevista a produção de 602,2 milhões de toneladas de cana, o que será capaz de gerar cerca de 3,6 milhões de toneladas de areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Um dos problemas enfrentados pelos administradores das usinas é quanto à disposição dessas areias de cinzas residuais provenientes da queima do bagaço, que pode ser temporária (armazenamento para reintrodução no cultivo da cana) ou definitiva no ambiente. Na maior parte dos casos, as areias de 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 eficiente (MANHÃES, 1999; FIESP/CIESP, 2001; SOUZA et al., 2007).

A areia de cinza ou a fuligem são recolhidas a partir de técnicas de lavagem e decantação, misturados ao material sólido (terra ou torta de filtro) e retornado às lavouras como fonte de partículas minerais e poucos nutrientes para a cultura da cana. O objetivo é

aproveitar a estrutura de distribuição dos demais resíduos e destinar esses materiais nas áreas próximas às unidades industriais (JENDIROBA, 2006).

Sabendo disso, muitos pesquisadores vêm desenvolvendo alternativas para uma disposição mais sustentável deste material, que não seja no ambiente, e também uma maneira de agregar valor ao subproduto. Com isso, além de diminuir o volume desses resíduos destinado a aterros sanitários controlados, as usinas de cana-de-açúcar, ao fornecerem a areia de cinza para uso mais racional, resolveriam parte do seu problema como a estocagem desse subproduto que ocupa um espaço considerável no pátio e despesas com transporte para descarte em aterros (MARTINS & ZANELLA, 2009).

### **2.3 POTENCIALIDADES DA AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Uma alternativa para a reciclagem da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, com base nos resultados conhecidos até o momento, seria a de estudar formas de aproveitamento desse subproduto como matéria-prima em produtos de construção civil.

Há uma grande parcela de resíduos, gerados pelos vários processos, que pode ser avaliada e identificada como fonte de matéria-prima para a construção civil. John et al. (1996) apontam que o aproveitamento de resíduos (industriais e agroindustriais) como material de construção é opção de proteção ambiental bastante relevante, pois a construção civil consome grandes volumes de matérias-primas e está distribuída em todas as regiões do país. John (1999) ainda afirma que essa contribuição se resulta importante quando se trata da substituição de recursos naturais abundantes, no caso dos agregados naturais.

A tecnologia do uso das cinzas na construção civil, investigada com êxito por vários autores (HERNÁNDEZ, 1998; KREUZ et al., 2002; ROCHA & CHERIAF, 2003; MARTINS et al., 2007, entre outros) serviu de embasamento para o desenvolvimento da pesquisa com a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, na busca da consolidação deste resíduo na viável produção de concretos. Dessa forma, seria possível evitar os problemas consequentes da sua má disposição utilizando-a como matéria-prima no desenvolvimento de tecnologias alternativas para materiais de construção.

Na literatura, as pesquisas que estudam a substituição de agregados naturais por cinzas são relativamente recentes (ANDRADE, 2007; MARTINS et al., 2007; KREUS et al., 2002; CYR & LUDMANN, 2006; RAJAMANE, 2007; BAI et al., 2005; AL-RAWAS, 2005; entre outros), sendo necessários novos estudos que possam contribuir cientificamente nessa área da engenharia.

As cinzas são subprodutos diretos de atividades industriais e/ou agroindustriais e podem também ser originadas da queima de outros resíduos devido à reincorporação dessas no processo. Elas ocupam lugar de destaque dentre os resíduos agroindustriais (celulose, polpa, bagaço etc.) por resultarem de vários processos de geração de energia e de secagem, podendo criar problemas de armazenamento e impacto ambiental (CINCOTTO, 1988). Pode ser citado como exemplo, a casca do arroz, resíduo incinerado para obtenção de energia e que gera a cinza da casca do arroz, um outro subproduto com alta pozolanicidade (PRUDÊNCIO JR., 2003), sendo atualmente investigado como adição mineral por vários pesquisadores (ZHANG et al., 1996; PRUDÊNCIO JR, 2003; NEHDI, 2003; PEKMEZCI, 2004; CORDEIRO, 2006; HORSAKULTHAI, 2011).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) vem sendo estudada como adição mineral em materiais cimentícios (FREITAS, 1996; HERNÁNDEZ, 1998; CORDEIRO, 2005; SOUZA et al., 2007; GANESAN et al., 2007; CORDEIRO et al., 2008; CORDEIRO et al., 2009; BANDALA et al., 2011; SOARES et al., 2012; entre outros) principalmente pelo aumento da geração desse resíduo em função da alta produção de álcool combustível e de açúcar nos últimos anos.

Esses pesquisadores submeteram a ACBC proveniente das caldeiras a tratamentos térmicos específicos, ou a moagem em tempos prolongados, ou mesmo a processos prévios de lavagem do bagaço, a fim de conferir características e propriedades específicas a esse resíduo, como por exemplo, a pozolanicidade para utilização como adição mineral. Este material, portanto, considera a cinza “pura” e é chamado pelos autores de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC).

O presente trabalho, no entanto, busca a utilização da ACBC sem tratamento específico que possa levar à mudança de seu comportamento. Na bibliografia consultada, foram observadas poucas pesquisas sobre o uso da ACBC como material inerte (carga) em produtos para a construção civil. Vale salientar que, mesmo com uma utilização diferente da de adição mineral, os autores, até o momento, consideravam a mesma nomenclatura para a CBC, tanto para uso como material inerte como para material com reatividade pozolânica. Desta forma, este trabalho propôs uma diferenciação na nomenclatura do material quanto à sua utilização: CBC (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) como material pozolânico; e ACBC (areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar) como material inerte.

Martins et al. (2007) utilizaram a ACBC (ou como chamado pelos autores de CBC) como substituto para o agregado miúdo natural. Como resultado, os corpos de prova com 100% de substituição da areia natural pela ACBC alcançaram valores de resistência mecânica duas vezes maiores que os exemplares de referência. Sabe-se que o elevado

custo da areia natural abre espaço para a entrada de outros materiais, como os resíduos, sendo esses de custo bem inferior (ZORDAN, 1999; LIMA, 1999; MIRANDA, 2005).

Nas amostras de ACBC utilizadas por Bessa (2011), não foi verificada reatividade pozolânica, a qual foi analisada por meio do ensaio de Chapelle modificado. As amostras foram coletadas e padronizadas quanto à sua granulometria (moagem por três minutos). Os resultados do consumo de CaO por grama de areia de cinza indicaram a que a ACBC consumiu 48 mg de CaO durante o tempo de ensaio, sendo que esse valor ficou muito abaixo de 330 mg de CaO, que é o valor mínimo esperado para que uma adição mineral seja considerada pozolânica.

Também são poucos os estudos que utilizam resíduos agroindustriais em substituição ao agregado miúdo, apesar da viabilidade e potencialidade indicada por vários autores (ROCHA & CHERIAF, 2003; ANDRADE, 2007; MARTINS et al., 2007; SALES & LIMA, 2010; SARMENTO & VANDERLEI, 2011). A ACBC tem se mostrado um subproduto viável para aplicação em materiais de construção (FREITAS, 1996; HERNÁNDEZ, 1998; CORDEIRO, 2004; CORDEIRO, 2005; MARTINS et al., 2007; PAULA, 2007), desde que sejam observadas suas características intrínsecas, como alto teor de sílica em forma de quartzo, um dos principais elementos presentes na areia natural.

Coelho e Batalione (2010) levantaram alguns fatores que vem fazendo muitas instituições de pesquisa e setores da indústria da Construção Civil (mineradoras, indústrias e comércio) a buscarem medidas e técnicas alternativas para o uso de agregados como material de construção. Esses fatores estão ligados ao aumento no custo dos agregados, ao agravamento da crise ambiental decorrente da degradação dos recursos naturais e de sua escassez, além de uma legislação e fiscalização cada vez mais rígida sobre o uso e exploração de jazidas destes materiais. Os agregados alternativos vêm sendo estudados de forma a substituir parcial ou totalmente, buscando um melhor desempenho e qualidade para a sua aplicação nas composições cimentícias.

John et al. (1996) afirmam que na caracterização dos resíduos devem ser selecionadas formas de reciclagem que maximizem o seu potencial intrínseco e que apresentem vantagens competitivas potenciais, em termos tanto de desempenho como de preço e custo. Por suas características, esse resíduo apresenta possibilidade real de utilização como material de carga (inerte), substituindo a areia em produtos de natureza cimentícia, com fins de produzir materiais de construção, tomando-se como exemplo outros estudos correlatos (JOHN, 1999; ROCHA & CHERIAF, 2003; ZARDO et al., 2004; ANDRADE, 2007; MARTINS et al., 2007).

Além disso, o reaproveitamento dos materiais pela reciclagem ou recuperação energética prolonga o ciclo de vida dos materiais componentes dos produtos representando, assim, uma forma de poupar recursos naturais não renováveis. O reaproveitamento de resíduos agroindustriais como matéria-prima de produtos de construção civil, pode contribuir tanto na diminuição dos custos dos componentes, assim como reduzir o descarte final dos resíduos sólidos nos aterros sanitários urbanos controlados e minimizar os riscos de sua má disposição.

# 3. AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETOS

Neste capítulo será apresentado um breve estudo sobre a corrosão de armaduras em concretos, buscando conceituar as fases de iniciação e propagação do processo corrosivo.

## 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A degradação dos materiais é produzida por processos físico-químicos em função da interação do material com o ambiente. Esta interação ocorre devido às características dos materiais e pelos mecanismos pelos quais os agentes agressivos podem ser transportados.

Em especial, o comportamento do concreto deve ser analisado frente aos agentes agressores em variadas circunstâncias. A durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto (relação água/cimento, resistência à compressão), da espessura e da qualidade do revestimento da armadura (CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO, 2007). A porosidade deste material é caracterizada por uma microestrutura de poros de várias dimensões, através dos quais podem penetrar as substâncias presentes no ambiente (BERTOLINI, 2010).

A incorporação de adições minerais em concretos pode ter um efeito benéfico sobre algumas de suas propriedades, fato esse que pode ser explicado devido à diminuição do tamanho dos poros, aumento da tortuosidade dos canais e à redução da interconectividade dos poros (HELENE, 1995).

Geralmente, quanto mais alta a resistência à compressão do concreto, maior é a durabilidade de uma peça confeccionada com ele. Porém, analisar isoladamente os valores de resistência não permite que seja feita uma projeção confiável da vida útil de uma estrutura (CARVAJAL et al., 2005).

Uma das principais responsáveis pela perda de durabilidade das estruturas de concreto é a agressividade do meio ambiente, que está relacionada às ações físicas e

químicas que atuam sobre as estruturas, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica ou retração hidráulica (NBR 6118, 2007).

De acordo com Salomão & Silva (2008), os mecanismos de deterioração da armadura são um dos principais problemas que podem afetar a vida útil das estruturas de concreto. Os danos ao concreto resultantes da corrosão podem se manifestar na forma de expansão, fissuração e eventual lascamento do cobrimento do concreto. Além da perda do cobrimento, um elemento de concreto armado pode sofrer dano estrutural devido à perda de aderência entre o aço e o concreto, bem como a redução da seção transversal da barra de aço (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Desta forma, a corrosão da armadura pode ser definida como a interação destrutiva ou a interação que implica na sua inutilização, por meio de reações eletroquímicas entre o material e o ambiente. O metal é convertido a um estado não metálico, levando à perda de suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade (CASCUDO, 1997).

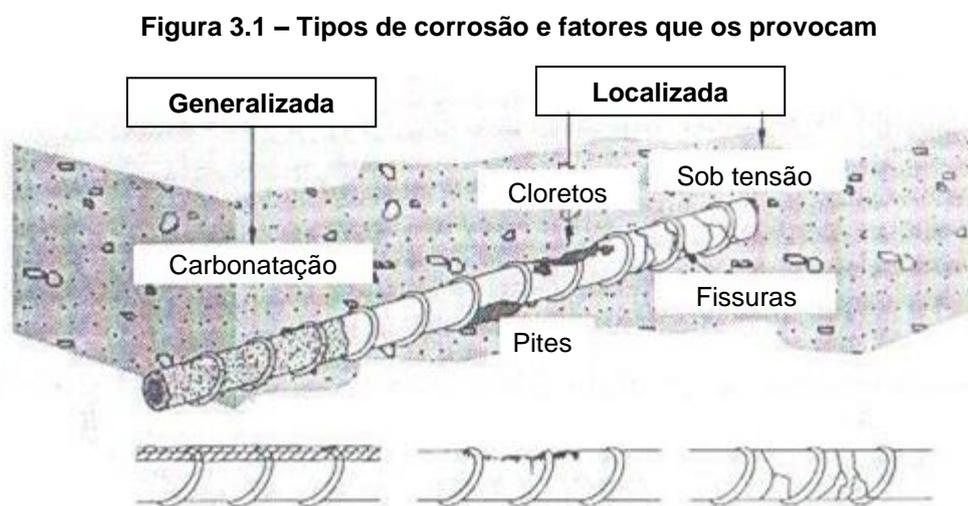
A corrosão pode ser seca ou aquosa, segundo a natureza do processo. A primeira, conhecida também por oxidação ou corrosão química, ocorre sob altas temperaturas e se dá pela reação gás metal, com a formação de uma película de óxido. Nas condições normais de uso das estruturas civis, este fenômeno não se mostra muito significativo. Por outro lado, a corrosão aquosa ou eletroquímica traz problemas consideráveis às obras civis. Este processo ocorre quando os materiais metálicos entram em contato com soluções aquosas, suscitando um movimento de elétrons ao longo de trechos da armadura e um movimento iônico através do eletrólito (meio aquoso), formando uma pilha ou célula de corrosão.

Além disso, segundo Gentil (1996), a corrosão eletroquímica da armadura no concreto também pode ser classificada quanto à tipologia: uniforme, puntiforme ou por pite, intergranular, transgranular, fragilização pelo hidrogênio. Elas podem se manifestar da seguinte forma:

- corrosão uniforme: corrosão em toda a superfície da armadura quando fica exposta ao meio agressivo;
- corrosão puntiforme ou por pite: os desgastes são localizados em áreas específicas, levando à formação de pequenas cavidades (pites), também chamados alvéolos;
- corrosão intergranular (ou intercrystalina): processa-se entre os grãos da rede cristalina do metal e quando os vergalhões sofrem, principalmente, tensões da tração, podem fissurar ou fraturar perdendo a estabilidade;

- corrosão transgranular (ou intragranular ou transcristalina): realiza-se nos grãos da rede cristalina do metal, podendo levar à fratura da estrutura, quando houver esforços mecânicos; e
- fragilização pelo hidrogênio: corrosão originada pela ação do hidrogênio atômico na sua difusão pelos vergalhões da armadura, propiciando a sua fragilização e, em consequência, a fatura.

De forma geral, Cascudo (1997) definiu a corrosão da armadura quanto à sua morfologia, sendo classificada em: generalizada, por pite e sob tensão fraturante. Uma representação esquemática de cada tipo de corrosão foi apresentada na Figura 3.1, bem como os principais fenômenos causadores de cada um deles.

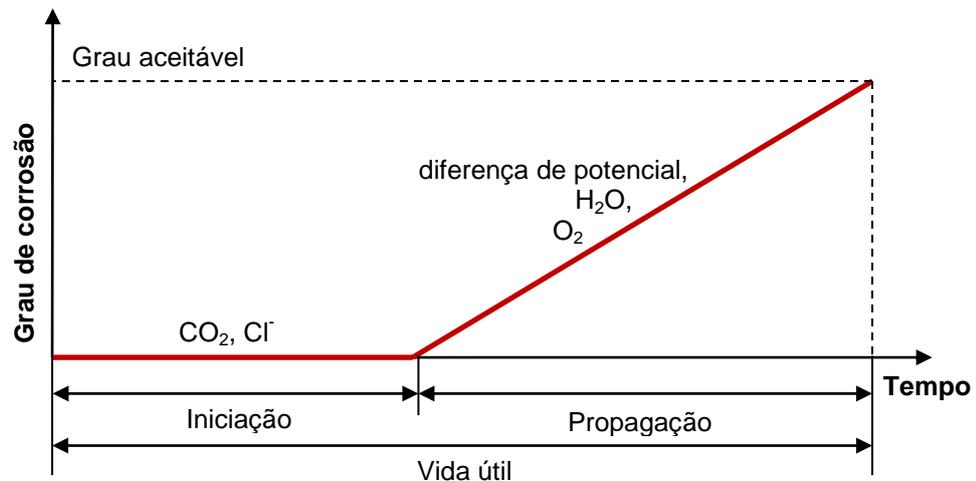


(Fonte: Cascudo, 1997)

A corrosão da armadura no concreto é iniciada quando a armadura perde a capa ou película protetora, de caráter passivo, que a envolve. Essa despassivação pode se dar pela carbonatação, devido à ação do gás carbônico da atmosfera, ou pela presença de elevado teor de cloretos. Quando a camada protetora é perdida, a armadura fica vulnerável à propagação da corrosão propriamente dita, por meio de processos eletroquímicos com a formação de uma pilha de corrosão.

Esta configuração é proposta por Tuutti (1982), citado por Cascudo (1997), que divide o processo corrosivo em duas partes: a iniciação e a propagação. Esse modelo de vida útil de uma estrutura de concreto armado foi apresentado na Figura 3.2, na qual pode se verificar os principais elementos que favorecem o desenvolvimento de cada etapa.

**Figura 3.2 – Etapas de um processo de corrosão de uma armadura**



(Fonte: adaptado de Cascudo, 1997)

A primeira etapa corresponde ao período de tempo que vai desde a execução da estrutura até a ação do agente agressivo em atravessar a barreira física (cobrimento) e química (película passivadora) do concreto que protege a armadura. A segunda fase, de propagação, consiste no desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo.

### 3.2 CARBONATAÇÃO

A carbonatação é uma reação físico-química responsável pela redução da alcalinidade da solução dos poros do concreto. Quando essa perda de alcalinidade atinge a região em contato com a armadura, pode levar à despassivação do aço, deixando-o vulnerável à propagação da corrosão. Esse processo de corrosão, induzido pela carbonatação, pode ser classificado do tipo generalizado, manifestando-se, usualmente, de maneira uniforme.

A solução dos poros do concreto se apresenta, inicialmente, saturada pelos compostos alcalinos hidratados e pelo hidróxido de cálcio presentes na matriz cimentícia. A neutralização desta matriz pode ser provocada pelos agentes agressores existentes na atmosfera, sendo que os principais constituintes são o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (CAZMIERCZAC & HELENE, 1993).

A carbonatação é um fenômeno que ocorre entre a portlandita (hidróxido de cálcio - CH) e o  $\text{CO}_2$  presente no ar, e tal reação depende diretamente da umidade relativa do ar, da concentração de  $\text{CO}_2$ , da pressão de penetração, da temperatura do meio ambiente, além do traço e adensamento do concreto (ATIS, 2003). Segundo Chang et al. (2003) a

carbonatação é um fenômeno importante na verificação da durabilidade do concreto, especialmente em cidades industrializadas, onde o teor de dióxido de carbono está acima da média, facilitando a carbonatação desse material.

Quanto ao ambiente, as condições básicas para a reação são a presença de dióxido de carbono no ar e de umidade. Para uma temperatura entre 20 a 25 °C e umidade relativa entre 50 a 80 %, a velocidade de carbonatação é máxima (COELHO, 2002; SIMAS, 2007, PAULETTI et al., 2007). O tipo de concreto também interfere na propagação da carbonatação. Altas relações a/c, resultam em concretos porosos e, portanto, aumentam as chances de difusão do CO<sub>2</sub> entre os poros. O adensamento irá influenciar na permeabilidade do concreto.

O dióxido de carbono penetra nos poros do concreto, dilui-se na umidade presente na estrutura e forma o composto chamado ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Esse ácido reage com alguns componentes da pasta de cimento hidratada e resulta em água e carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). O composto que reage rapidamente com o H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> é o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). O carbonato de cálcio não deteriora o concreto, porém durante a sua formação, consome os álcalis da pasta (Ca(OH)<sub>2</sub> e C-S-H) e reduz o pH (TOKUDOME, 2009).

A reação que define a carbonatação do CH pode ser representada na Equação 1:



A cobertura alcalina que envolve a armadura preserva a estabilidade do filme passivo sobre o aço. Normalmente, a alcalinidade promovida pela presença dos álcalis na solução dos poros e cerca de 20%, em massa, de hidróxido de cálcio sólido são suficientes para manter o pH acima de 12. O valor mínimo do pH para conservar a estabilidade do filme passivo é cerca de 11,5. Valores abaixo deste, verificados na região carbonatada, podem resultar na destruição do filme passivador e, conseqüentemente, na corrosão da armadura (CHANG et al., 2003; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Do ponto de vista físico, ocorre a deposição do carbonato nos poros, obturando-os e colmatando-os, ao longo do tempo. Com isso, os poros ficam menos interconectados. Desta forma, a própria carbonatação consiste em barreira eficaz contra si mesma e a colmatação dos poros colabora com o aumento da dureza superficial do concreto, fato benéfico a concretos sujeitos a abrasão, além de, também, aumentar a proteção contra a ação de sulfatos (HELENE, 1993).

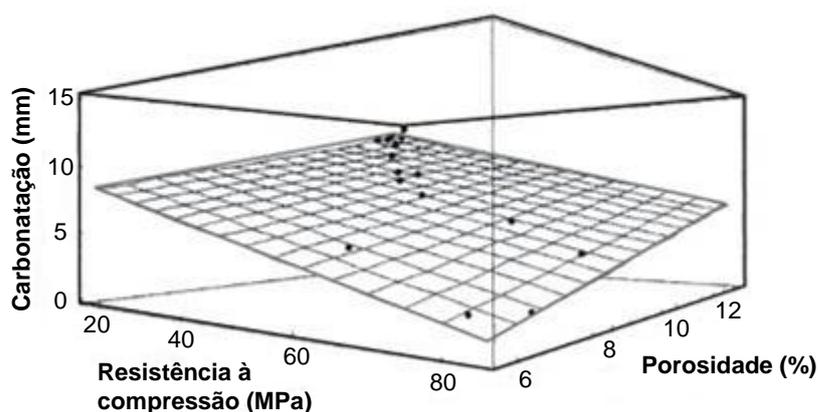
Alguns pesquisadores mostraram a influência do uso de agregados alternativos na frente de carbonatação de matrizes cimentícias.

Em pesquisa feita com concretos utilizando resíduo da construção civil como agregado miúdo, a substituição total da areia provocou um aumento de 6% da profundidade de carbonatação aos 180 dias em ambiente com 20% de CO<sub>2</sub> (MOURA et al., 2007).

Hoppe et al. (2007) avaliaram o efeito da carbonatação em ensaio acelerado em concretos utilizando a cinza da casca do arroz como substituto do cimento. Os resultados indicaram que a adição do resíduo levou a um aumento da frente de carbonatação. Além disso, os concretos utilizando cinzas não moídas apresentaram valores de profundidade de carbonatação maiores do que aqueles que utilizaram as cinzas moídas previamente.

Em estudos de concretos com cinza volante, Atis (2004) apresentou uma relação entre porosidade, carbonatação e resistência à compressão. Quanto menor a porosidade e maior a resistência à compressão, menor é a profundidade de carbonatação do concreto (Figura 3.3).

**Figura 3.3 – Esquema tridimensional da relação entre carbonatação, resistência à compressão e porosidade em concretos**



(Fonte: adaptado de Atis, 2004)

A aplicação da cinza volante em concretos também foi verificada por Younsi e outros (2011). Independentemente do tipo de cura, os resultados mostraram que o concreto com adição do resíduo como substituto do cimento apresentou resistência à propagação da carbonatação assim como o concreto de referência.

Sim e Park (2011) analisaram a profundidade de carbonatação em concretos feitos com agregados reciclados de concreto (miúdo e graúdo) e cinza volante, em diferentes proporções. A substituição de até 30% de agregado miúdo reciclado mostrou um aumento na profundidade de carbonatação com a adição de cinza volante como material pozolânico. Esse fenômeno foi explicado pela redução do teor de álcalis presente nos materiais cimentícios. Essa redução se deu pela substituição parcial do cimento na mistura do

concreto e pela formação de silicato de cálcio hidratado na reação pozolânica, a qual absorve íons alcalinos, diminuindo o nível de pH do concreto.

Sarmento e Vanderlei (2011) apresentaram um estudo de durabilidade de concreto com incorporação da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar com base, dentre outras verificações, na profundidade da carbonatação em ensaio acelerado. Os resultados demonstraram que a substituição de até 30% da areia por cinza não diminuiu a capacidade do concreto de resistir à carbonatação. Em outro estudo, Lima et al. (2011) concluíram que a frente de carbonatação natural de concretos produzidos com 30% e 50% de areia de cinza da cana-de-açúcar é similar ao concreto sem adição das cinzas.

Apesar da ação da carbonatação poder ser prejudicial em estruturas de concreto, em muitos casos, para uma análise comparativa, Kulakowski (2002) afirma que a investigação em argamassas é mais vantajosa do que em amostras de concreto. Isso se justifica, pois as dimensões e consumo de materiais em corpos de prova de argamassa são bastante reduzidos e cuja leitura pode ser mais clara. O concreto pode apresentar uma profundidade de carbonatação inferior a da argamassa, pois a fração de agregado graúdo estabelece uma área menor sujeita a poros permeáveis, contribuindo como barreira para o avanço da frente de carbonatação. Além disso, dificuldade de realização de leituras durante o ensaio em concretos pode levar à maior variabilidade das medidas de profundidade de carbonatação, pois o agregado graúdo apresenta porosidade inferior à da matriz composta pela pasta de cimento. A forma do corpo de prova também influencia na propagação da carbonatação, sendo que, nos corpos de prova prismáticos, esta frente pode ser menor do que aquela verificada em corpos de prova cilíndricos.

Khunthongkeaw et al. (2006) verificaram que a adição de cinza volante em corpos de prova de argamassa com até 30% de substituição ao cimento não provocou diferenças significativas de profundidade de carbonatação entre argamassas e concretos.

Wolf (2010) também utilizou corpos de prova de argamassas com cimento branco e diferentes teores de calcário para verificar o efeito da carbonatação. Considerando as mesmas condições para ambas as amostras, as argamassas com cimento branco apresentaram frente de carbonatação inferior às argamassas com cimento cinza. Além disso, para elevados teores de adição de calcário, pode-se perceber alguma interação química entre este material e a pasta, o que provocou o aumento da carbonatação nas argamassas com adição.

### 3.3 PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Assim como a diminuição da alcalinidade do concreto nas reações de carbonatação, a presença de uma quantidade considerável de íons cloretos faz com que a película passiva do concreto seja perdida, deixando vulnerável aos processos de corrosão.

De acordo com Cascudo (1997), os cloretos são os principais contaminantes comuns responsáveis pela corrosão dos metais no concreto. A presença do cloreto só apresenta um risco para a armadura no concreto quando este está livre, na forma de íons cloretos ( $\text{Cl}^-$ ). Eles agem de forma localizada, rompendo localmente o filme de passividade. Essa corrosão é, portanto, do tipo puntiforme ou por pite.

Em geral, este tipo de corrosão ocorre tipicamente nos ambientes marinhos, salmouras industriais ou nas zonas em que são utilizados sais de degelo (empregados nos invernos rigorosos de países frios, normalmente à base de  $\text{NaCl}$  ou  $\text{CaCl}_2$ ). Além disso, os íons cloretos podem ser introduzidos no concreto com o uso de agentes aceleradores de pega e endurecimento, ou com uso de agregados e água de amassamento contaminados (CASCUDO, 1997; BERTOLINI, 2010).

Segundo Bertolini (2010), por ser extremamente localizado, esse tipo de ataque é perigoso. A área na qual se rompe o filme passivo é frequentemente muito pequena e circundada por uma ampla área ainda passiva. Logo, esse tipo de corrosão pode levar à perfuração do componente de aço (formação de alvéolos) e à possibilidade de que pites provoquem fissuras de corrosão sob tensão.

O valor limite para que o aço perca a proteção contra a corrosão pode ser considerado uma relação molar  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  maior do que 0,6. Isso porque, provavelmente, o filme do óxido de ferro se torna permeável ou instável sob essas condições, dado que o balanço entre a alcalinidade (verificada pela atividade do íon  $\text{OH}^-$ ), e a acidez (verificada pela atividade do íon  $\text{Cl}^-$ ), é responsável pela manutenção da capa passivadora do aço. Usualmente, em uma dosagem de concreto, o teor limite de cloreto para se iniciar um processo de corrosão está entre 0,6 e 0,9 kg de  $\text{Cl}^-$  por metro cúbico de concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Em diversas normalizações analisadas por Cascudo (1997), verificou-se um consenso de conteúdo de cloreto limite de 0,4% em relação à massa de cimento, apesar de alguns trabalhos indicarem que, relações na ordem de 0,15%, já eram possíveis se verificar a corrosão induzida por esses íons.

Mehta & Monteiro (2008) ainda apontaram que, em altos teores de cloretos, o concreto tende a reter mais umidade, aumentando o risco de corrosão pela diminuição de sua resistividade elétrica<sup>1</sup>.

No concreto, o cloreto pode se apresentar em três formas: quimicamente, ligado ao aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), formando cloroaluminato de cálcio ( $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ ); adsorvido na superfície dos poros; e sob a forma de íons livres. Por maior que seja a capacidade de um dado concreto de ligar-se quimicamente ou adsorver fisicamente íons cloretos, sempre haverá um estado de equilíbrio entre as três formas apresentadas, de maneira que sempre existirá algum teor de  $Cl^-$  livre na fase líquida do concreto. Esses cloretos livres são os que, efetivamente, causam preocupação para a corrosão (CASCUDO, 1997).

Além disso, Cascudo (1997) afirma que os mecanismos de transporte que levam ao movimento e concentração iônica dos cloretos no concreto são absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sobre pressão e migração iônica, sendo os dois primeiros os principais mecanismos que se verificam na maioria dos casos. A absorção acontece em uma camada superficial do concreto, geralmente onde ocorre a molhagem e secagem do revestimento pela ação das intempéries; mais para o interior do concreto, onde a presença do eletrólito é mais constante, com uma diferença do gradiente de concentração iônica com o meio externo ou outras estratificações internas, tem-se basicamente a difusão.

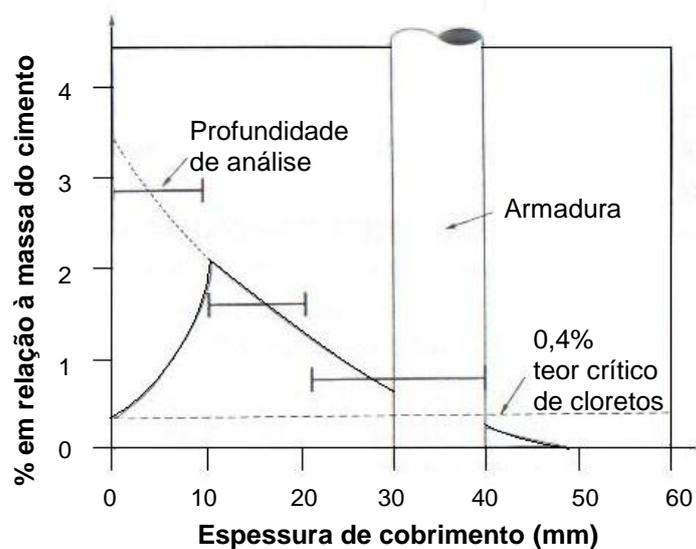
O mesmo autor apresentou um perfil típico da concentração de cloretos ao longo de um revestimento de concreto, o qual é submetido a contaminantes externos de soluções contendo cloreto, desde a superfície até a armadura. Este perfil pode ser verificado na Figura 3.4.

Nas primeiras profundidades, onde predomina a absorção, verifica-se um crescimento gradual do teor de cloretos até uma concentração máxima, devido à ação da lixiviação pelas águas pluviais que atuam na zona de molhagem e secagem junto à superfície. Na zona de difusão, a partir do limite máximo, o teor de cloreto tende a diminuir com a profundidade porque a contaminação do cloreto por impregnação vem de fora para dentro.

---

<sup>1</sup> Resistividade elétrica é a propriedade que caracteriza a dificuldade de movimentação dos íons no concreto, ou seja, ela controla o fluxo de íons que difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto (HELENE, 1993).

**Figura 3.4 – Perfil típico de um cobrimento de concentração de cloretos ao longo do cobrimento em um concreto contaminado**



Em concretos contendo adições minerais, a resistência à penetração de cloretos não pode ser explicada e justificada apenas por uma influência isolada (química ou física) desta adição. Isso foi concluído por Gomes (2003), em estudos comparativos entre a tendência de teor de cloretos retidos, relação de  $Cl^-/OH^-$ , condutividade específica e volume total de poros. A maior ou menor contribuição desses parâmetros depende da mistura do aglomerante e do ativador utilizado.

Alguns pesquisadores verificaram a resistência contra a penetração de cloretos em concretos e argamassas com adições de diferentes resíduos.

Chindaprasirt et al. (2007) concluíram que a resistência à penetração de íons cloretos no concreto é aumentada significativamente com a incorporação de cinza volante. Quanto maior é a finura da cinza volante, melhor será a sua capacidade de preencher e diminuir o tamanho dos poros na matriz cimentícia, dificultando a penetração do cloreto no concreto.

Outro pesquisador que apresentou trabalhos com cinza volante no concreto foi Yazici (2008). O estudo consistiu na substituição do cimento Portland por teores de cinza variando de 30% a 60%, em massa, além da adição de 10% de sílica ativa para as misturas com altos teores de cinza volante. O desempenho contra a penetração de cloretos foi melhor nos concretos com maiores teores de cinza volante, sendo otimizado, ainda, com a adição de sílica ativa. Verificou-se uma redução de cerca de 50% da profundidade de penetração de cloretos nos concretos com 60% de cinza volante e 10% de sílica ativa, em comparação ao concreto referência, sem adição.

Chalee e outros (2009) também analisaram a frente de cloretos com a adição de cinza volante no concreto, submetido a uma exposição de até cinco anos em ambiente marinho. Os resultados indicaram que teores de cinza acima de 50%, em massa, em substituição do cimento Portland, e os baixos fatores água/cimento, proporcionaram uma boa resistência dos concretos à penetração dos cloretos.

Em outro estudo, Chindaprasirt et al. (2008) verificaram a influência na penetração de cloretos da adição de cinza de palmeira, cinza da casca de arroz e cinza volante como substitutos parciais do cimento Portland em argamassas. A resistência ao ataque de cloretos aumentou, substancialmente, com o aumento das adições desses materiais pozolânicos (40% de substituição, em massa). Em especial, a cinza da casca de arroz se mostrou mais efetiva nesta verificação, seguida da cinza de palmeira e cinza volante, respectivamente.

A cinza da casa do arroz, como material pozolânico em concretos, também foi verificada por Gastaldini et al. (2010). A substituição do resíduo pelo cimento Portland foi analisada para os teores de 10%, 20% e 30%. O aumento do teor de cinza de casa de arroz resultou em concretos com maior resistência à penetração de cloretos.

A adição de resíduos de borracha de pneus granulado como substituto parcial da areia em argamassas foi verificado por Oikonomou e Mavridou (2009). Apesar dos resultados mostrarem uma diminuição das propriedades mecânicas destas argamassas, a resistência à penetração de cloretos foi aumentada com a adição de até 15%, em massa, deste resíduo.

Sim e Park (2011) analisaram a penetração de cloretos em concretos feitos com agregados reciclados de concreto (miúdo e graúdo) e cinza volante como material pozolânico, em diferentes proporções. A profundidade de penetração praticamente não foi alterada com a substituição do agregado reciclado, mas apresentou um decréscimo considerável com a substituição da cinza volante.

Higashiyama et al. (2012) verificaram o uso de resíduo de cerâmica como agregado miúdo em argamassas. A profundidade de penetração de cloretos nas argamassas com substituição total do resíduo foi diminuída pela metade em comparação à profundidade verificada nas argamassas produzidas com areia de rio, em ensaio acelerado com três meses de imersão em solução salina.

Em uma proposta mais afim ao presente trabalho, Sarmento e Vanderlei (2011) optaram pela verificação da penetração de cloretos em concretos com adição da ACBC como agregado miúdo e concluíram que a utilização deste resíduo não interfere de forma

negativa nos concretos, mostrando ainda uma ligeira melhora na resistência contra esta intempérie para teores de 15% a 25% de ACBC.

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO ELETROQUÍMICO

Com a perda da camada de passivação que protege a armadura no concreto, esta passa a ficar vulnerável para o desenvolvimento da corrosão, desde que haja os elementos básicos para a sua propagação: eletrólito, diferença de potencial e oxigênio, podendo existir agentes agressivos. A corrosão do aço ocorre por meio de mecanismos eletroquímicos, cuja célula de corrosão é formada por quatro processos específicos, definidos por Bertolini (2010):

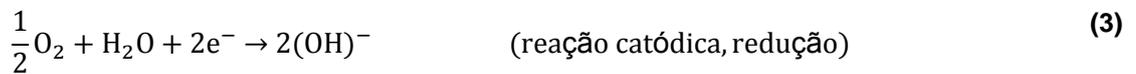
- uma reação anódica de oxidação da armadura, que propicia a formação de produtos de corrosão e torna disponíveis elétrons na rede cristalina do aço;
- uma reação catódica, que reduz uma espécie química presente no ambiente agressivo e consome os elétrons produzidos pelo ânodo;
- a circulação de corrente na armadura, gerada pelo fluxo de elétrons na rede cristalina do metal;
- a circulação de corrente no ambiente, produzida pela migração elétrica dos íons dissolvidos na solução líquida (eletrólito) em contato com o aço.

O ânodo e o cátodo se estabelecem a partir de uma diferença de potencial (ddp) entre duas regiões adjacentes ao longo da armadura, que propicia o movimento de elétrons entre elas, além do eletrólito que permite o movimento iônico. A formação de uma ddp pode ser devida a diversos fatores, conforme citado por Cascudo (1997) e Bertolini (2010): aeração diferencial do concreto, solicitações mecânicas distintas no aço e no concreto, diferenças na composição química e superfície do aço (incluindo a heterogeneidade da fase metálica), concentração salina diferencial, variações de pH produzidas pelas reações eletroquímicas, entre outros.

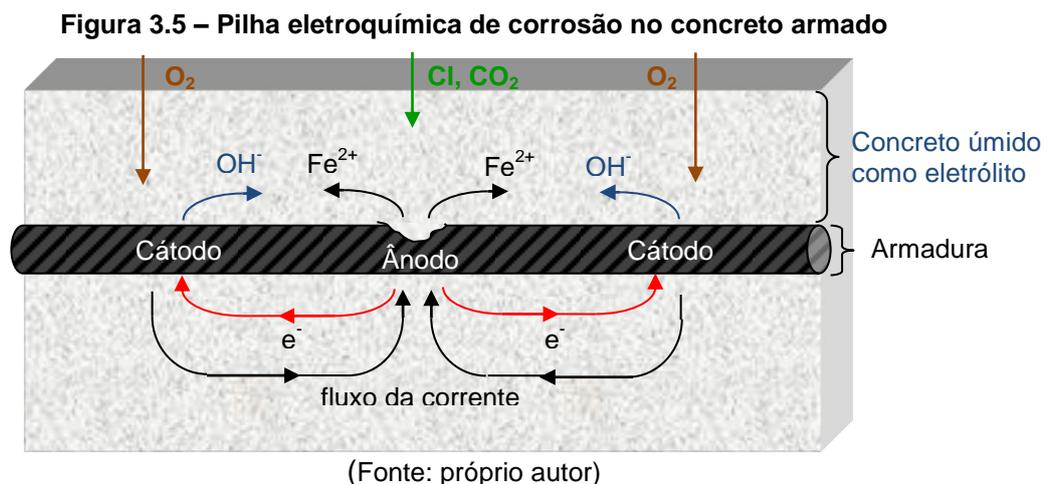
O principal causador de uma ddp, contudo, é a aeração diferencial devida à maior ou menor compactidade e qualidade do concreto. Nas zonas com maior quantidade de oxigênio, regiões mais porosas do concreto, verifica-se uma tendência maior de ocorrência de reação catódica, enquanto nas regiões caracterizadas por uma menor quantidade de oxigênio desenvolve-se, principalmente, a reação anódica. Devido a essa diferença de aeração da superfície do aço no concreto, o ataque tende a concentrar-se nas zonas pouco aeradas (BERTOLINI, 2010).

Nesta fase de propagação os agentes agressivos, como os cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), sulfetos ( $\text{S}^{2-}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitritos ( $\text{NO}_3^-$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), etc, contribuem apenas para acelerar o processo de corrosão, pois aumentam sensivelmente a condutividade elétrica do eletrólito. Na presença de íons cloretos, a partir do momento que a passividade da armadura é destruída, a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio passam a controlar a taxa de corrosão (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

As reações básicas que ocorrem em um processo de corrosão podem ser definidas pelas Equações 2 e 3.



É possível observar na Figura 3.5 uma representação esquemática do processo eletroquímico de corrosão do aço em um concreto úmido e permeável. Nesta representação, é ilustrada a formação de uma célula galvânica onde, no processo anódico, ocorre a oxidação do ferro pela remoção do filme passivador (devido a ação da carbonatação ou íon cloreto) e, no processo catódico, ocorre a redução do oxigênio, em presença de água, na superfície do aço.

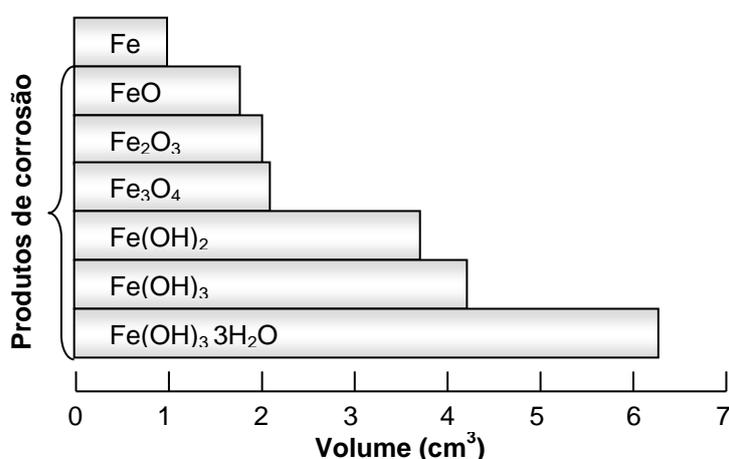


Bertolini (2010) ainda cita o fato de que, nas zonas catódicas, pode ocorrer um aumento do pH pela produção de íons  $\text{OH}^-$ , ou o consumo de  $\text{H}^+$  (formação de  $\text{H}_2\text{O}$  pela redução do  $\text{H}^+$  com o  $\text{O}_2$ , em ambientes ácidos), ou o desenvolvimento de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ).

Já nas zonas anódicas, geralmente ocorre a produção de acidez (formação de  $H^+$ ). Neste sentido, verifica-se uma acidificação na zona anódica e uma alcalinização da zona catódica, fazendo com que o próprio processo tenda a criar condições de heterogeneidade. O aço, portanto, é atacado, ainda mais, na zona anódica, e protegido na zona catódica devido ao aumento do pH nesta área.

Alguns dos produtos de corrosão (ferrugem) derivados das reações de oxidação do aço, definidas de forma genérica por  $FeO.(H_2O)_x$ , podem ser verificados na Figura 3.6.

**Figura 3.6 – Representação do aumento de volume sólido dos produtos de corrosão**



(Fonte: adaptado de Mehta & Monteiro, 2008)

Os produtos da corrosão do ferro metálico podem ser acompanhados por um aumento de volume da ordem de 600% em relação ao metal original. Pelos dados apresentados na Figura 3.6, foi possível verificar a variação de volume dos principais produtos da corrosão, dependendo do estado de oxidação. Mehta e Monteiro (2008) acreditam que esse aumento de volume seja a principal causa da expansão e fissuração do concreto.

### 3.5 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

As medidas eletroquímicas de avaliação da corrosão de armaduras consistem na verificação de parâmetros relacionados diretamente com a evolução do processo corrosivo. Cascudo (1997) afirma que os métodos eletroquímicos são muito importantes nos estudos de corrosão pela sensibilidade, rapidez e caráter não destrutivo.

De acordo com Silva (2006), a avaliação da corrosão da armadura do concreto pode ser feita por meio de seis técnicas eletroquímicas. Essas técnicas podem ser perturbativas,

que enviam estímulos (em corrente contínua ou alternada) ao eletrodo de trabalho, ou não perturbativas, que não utilizam de fontes externas para as leituras eletroquímicas. As técnicas não perturbativas são: medida do potencial de corrosão, resistividade elétrica e ruídos eletroquímicos. As técnicas perturbativas são: curvas de polarização, resistência de polarização e impedância eletroquímica.

Segundo Bertolini (2010), os métodos eletroquímicos utilizados com maior frequência são as medidas de potencial de corrosão e de polarização. Cascudo (1997) afirmou que, apesar do seu caráter qualitativo, o levantamento de potenciais de corrosão constitui-se ainda no procedimento de campo mais utilizado para monitorar estruturas de concreto armado em relação à corrosão de armaduras. No presente trabalho, foram utilizadas as técnicas de potencial de corrosão e curvas de polarização, as quais foram detalhadas a seguir.

### **3.5.1 TÉCNICA ELETROQUÍMICA DE POTENCIAIS DE CORROSÃO**

O método utilizado foi inicialmente desenvolvido nos Estados Unidos para monitorar a corrosão do aço no concreto, a partir dos anos 50. A partir de então, passou a ser largamente utilizado tanto naquele país como na Europa, como instrumento auxiliar no controle das estruturas de concreto (CASCUDO, 1997).

A técnica de potencial de eletrodo ou de corrosão ( $E_{corr}$ ) é uma medida direta, verificado em circuito aberto, medido com corrente zero no sistema (sem perturbação), e que utiliza um eletrodo de referência, em relação ao qual os potenciais são tomados. A magnitude desses potenciais indica o risco de corrosão. Segundo Hansson (1984), a medida de potencial indica uma maior ou menor facilidade de transferência de carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto e que, portanto, é uma propriedade da interface aço-concreto e não somente do aço.

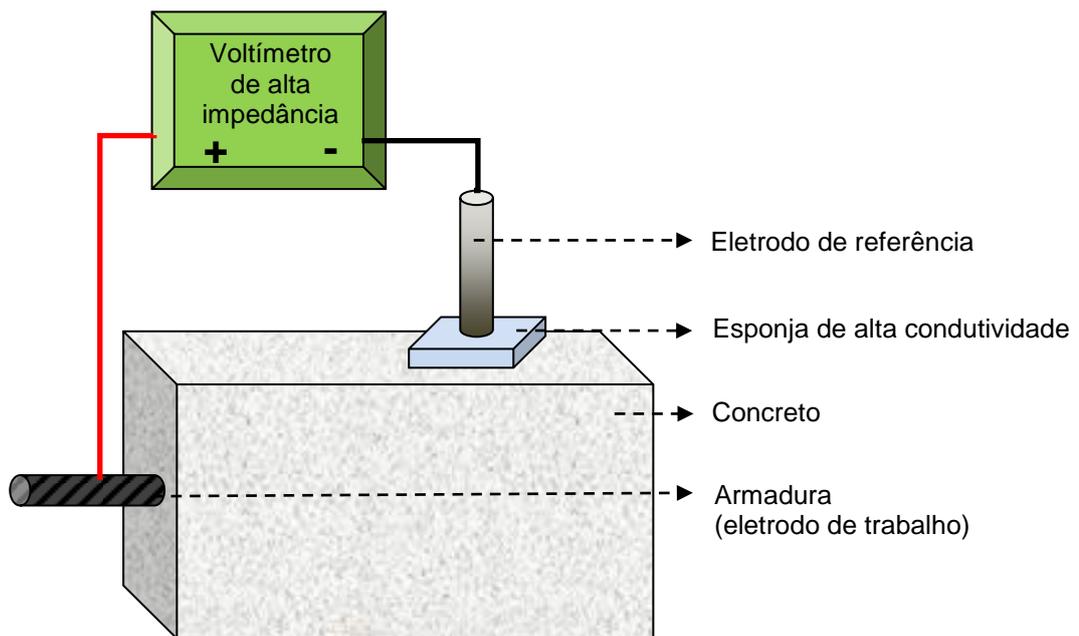
A leitura do método consiste na diferença de potencial verificada entre duas semicélulas: a semicélula aço/concreto (eletrólito) e a semicélula estável que é o eletrodo de referência. O eletrodo de referência é capaz de detectar a presença das linhas de corrente que se verificam quando há um processo eletroquímico de corrosão das armaduras. Deste modo, nos locais onde passam essas linhas de corrente (entre as regiões catódicas e anódicas) os potenciais medidos pelo voltímetro tendem a ser mais eletronegativos do que nos locais passivados, sem corrosão. Estas regiões com característica de maior eletronegatividade indicam a presença de zonas ativas de corrosão nas barras (CASCUDO, 1997).

O eletrodo de referência é constituído por um metal imerso em uma solução adequada, de modo que, sobre a superfície do metal, possa ocorrer uma determinada reação química. Se durante as medições não houver circulação de corrente, o eletrodo de referência irá apresentar um potencial constante de equilíbrio da reação que o caracteriza.

Os principais tipos de eletrodo de referência foram listados por Bertolini (2010), que podem ser de: hidrogênio (EPH – eletrodo padrão de hidrogênio), calomelano saturado (ECS,  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , em solução KCl saturado), prata/cloreto de prata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ , em solução de KCl saturado ou em concentração 0,1M), cobre/sulfato de cobre (ESC,  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), zinco/água do mar, entre outros. Cascudo (1997) afirma que os eletrodos de referência mais utilizados são os de calomelano saturado e o de cobre/sulfato de cobre.

A representação esquemática para a realização da técnica de potencial de corrosão pode ser observada na Figura 3.7.

**Figura 3.7 – Esquema para medida de potencial de corrosão**



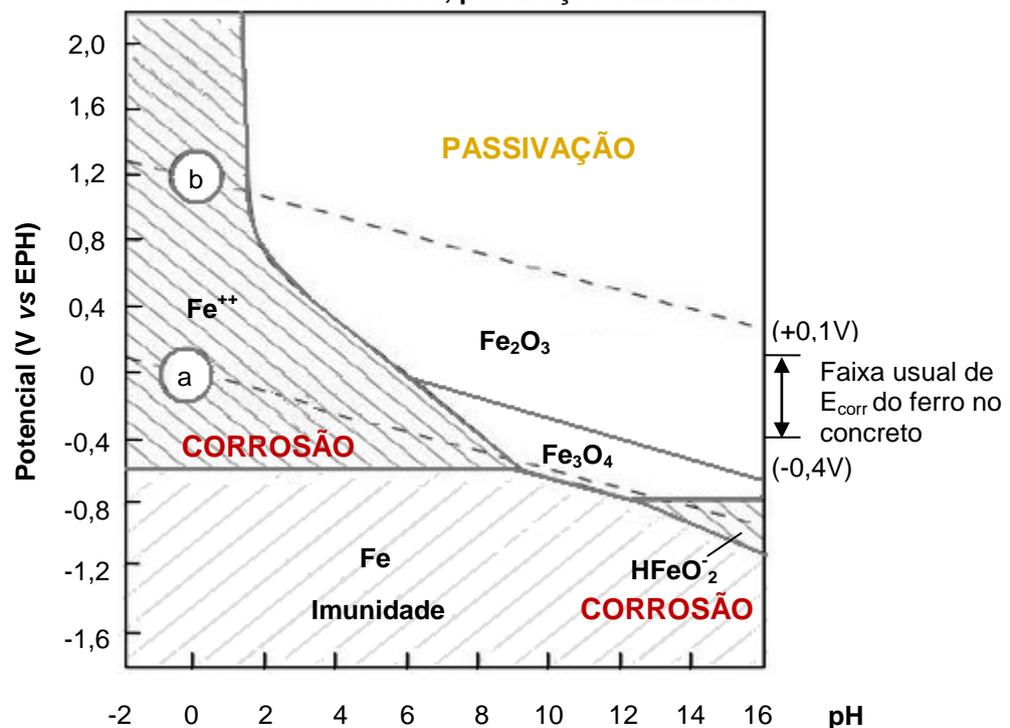
(Fonte: próprio autor)

Nesta técnica, o eletrodo de trabalho é conectado a um voltímetro de alta impedância pelo polo positivo, e o eletrodo de referência, pelo polo negativo. No sentido de permitir a ligação através de um meio condutor entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto com a armadura a ser medida (eletrodo de trabalho) é posicionado uma esponja saturada com solução de alta condutividade

Esse ensaio é padronizado pela ASTM C876-91 (2009) e, de acordo com os valores de potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) obtidos, tem-se a probabilidade de ocorrer corrosão. A norma considera o eletrodo referência de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , sendo que os valores de  $E_{\text{corr}}$  mais negativos que  $-350$  mV indicam um estado ativo, com probabilidade de corrosão superior a 90%. Valores mais positivos que  $-200$  mV indicam um estado passivo, com a probabilidade de corrosão inferior a 10%. A probabilidade de corrosão é considerada incerta para o intervalo entre  $-200$  mV e  $-350$  mV.

Cascudo (1997) apresentou o diagrama elaborado por Pourbaix (Figura 3.8), no qual relaciona o potencial versus pH do sistema ferro-água, a  $25^\circ\text{C}$ .

**Figura 3.8 – Diagrama de Pourbaix: potencial x pH, para o sistema  $\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}$  a  $25^\circ\text{C}$ , delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade**



(Fonte: adaptado de Cascudo, 1997)

Em situações normais do concreto, com pH em torno de 12,5, e para uma faixa usual de potencial de corrosão da armadura no concreto, da ordem de  $+0,1$  a  $-0,4$  V, considerando um eletrodo padrão de hidrogênio (EPH), pode-se verificar que o ferro se apresenta em um estado de passivação.

Cascudo (1997) ainda define alguns fatores que podem interferir nas medidas de potencial:

- a existência de camadas superficiais secas de concreto, com alta resistividade. A corrente de corrosão (iônica) tende a evitar o concreto resistivo, implicando na não identificação de áreas que estejam efetivamente corroídas;
- a qualidade do concreto e a profundidade de cobrimento também influenciam na resistividade. Concretos com baixo teor água/cimento apresentam uma estrutura mais compacta, de alta resistividade, por possuir menos eletrólito em seus poros e dificultado o caminho iônico até a superfície de concreto (onde está o eletrodo de referência). Quanto maior o cobrimento, maior a dificuldade de identificação do processo de corrosão;
- a carbonatação e a frente de cloretos provocam situações contrárias de leitura. A primeira atua similarmente a uma camada superficial seca, de alta resistividade. A presença de íons cloretos na superfície tende a fornecer leituras de potenciais mais negativas do que as reais.

As vantagens apresentadas por essa técnica em inspeção de corrosão nas estruturas de concreto armado, segundo Torres (2006), podem ser: delimitação de áreas comprometidas, monitoramento da estrutura, sensibilidade para verificar mudanças no estado superficial da armadura, levantamento de potenciais eletroquímicos, método não destrutivo, com facilidade e rapidez em sua execução.

Entretanto, essa técnica indica apenas a maior ou menor facilidade de transferência de carga elétrica, não apresentando um registro de correlação entre a magnitude dos potenciais e dados quantitativos de corrosão. Ou seja, os resultados obtidos por essa técnica não podem ser confundidos com dados que traduzem a intensidade e a cinética do processo corrosivo, como a taxa ou velocidade de corrosão. Deste modo, admite-se, portanto, que esta técnica é meramente qualitativa (HANSSON, 1984; CASCUDO, 1997; TORRES, 2006).

Alguns dos autores que utilizaram do método de potencial de corrosão em seus estudos foram: Cabral (2000); Joukoski (2003); Santos (2006); Silva (2006); Torres (2006); Ribeiro (2010); Silva (2010), e Bandala et al. (2011).

### **3.5.2 TÉCNICA ELETROQUÍMICA DE CURVAS DE POLARIZAÇÃO**

Como visto anteriormente, uma das deficiências da técnica de potencial de corrosão é a falta de dados que representem, quantitativamente, a cinética da corrosão. Desta forma, esta técnica foi utilizada no presente estudo a fim de se obter dados, principalmente, sobre as taxas (velocidades) de corrosão das armaduras ( $i_{corr}$ ).

O método de curvas de polarização foi uma das primeiras técnicas eletroquímicas a ser, efetivamente, empregada em corpos de prova de aço, embebido em concreto, para análise do processo corrosivo (CASCUDO, 1997).

A técnica consiste em verificar a corrente elétrica à medida que se aplica um sobrepotencial em torno do potencial de equilíbrio de um sistema de corrosão. Ou seja, a técnica registra as relações corrente-potencial de um sistema, a partir de condições controladas. A curva de polarização é uma associação entre sobrepotencial (ou sobretensão,  $\eta$ ), versus densidade de corrente ( $i$ , ou logaritmo da densidade de corrente,  $\log i$ ).

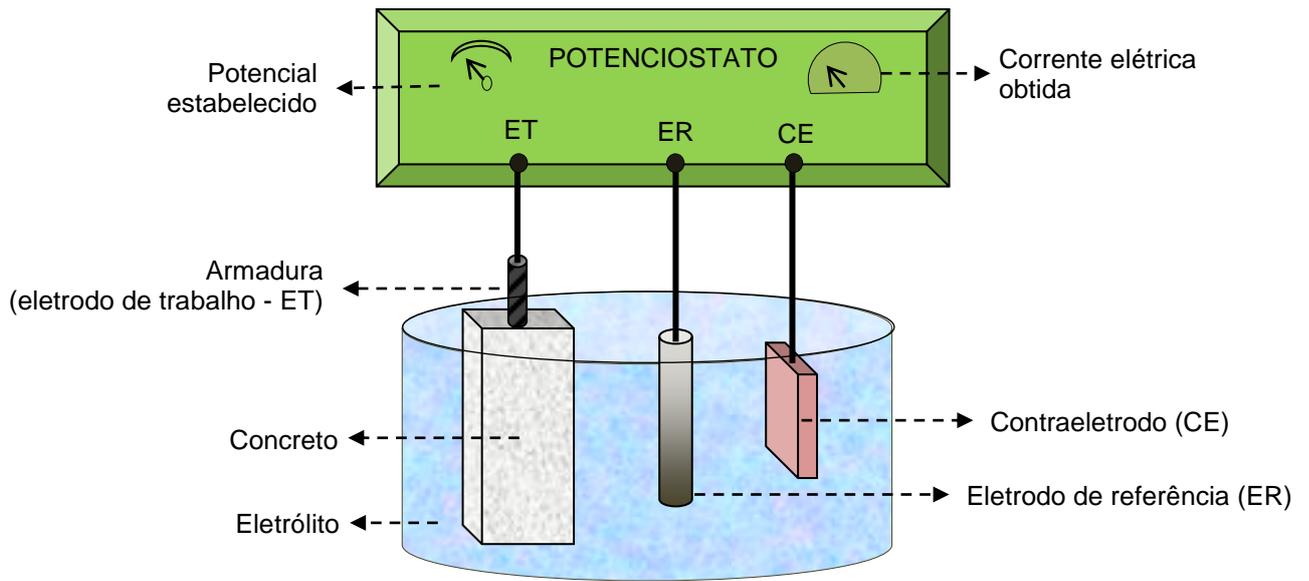
Esta polarização da curva sobre o potencial de equilíbrio do sistema é feito por meio de um potenciostato (ou galvanostato), que aplica um potencial, de forma controlada, conforme se deseje polarização anódica ou catódica.

O princípio da técnica, segundo Cascudo (1997), pode ser entendido da seguinte forma: quando uma amostra metálica está em meio corrosivo, ela assume um potencial de equilíbrio (em relação a um eletrodo de referência), conhecido como potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ). Neste potencial, a amostra apresenta correntes anódicas e catódicas de igual magnitude em sua superfície, indicando que a corrente total resultante é nula. A técnica de polarização consiste em aplicar sobretensões em relação ao  $E_{\text{corr}}$ , tanto no sentido anódico (valores de potenciais mais positivos que o  $E_{\text{corr}}$ ), como no sentido catódico (valores de potenciais mais negativos que o  $E_{\text{corr}}$ ).

Para isso, é necessária a utilização de um potenciostato que imponha uma varredura do potencial e trace a evolução da corrente externa (anódica e catódica) em função do potencial imposto (BERTOLINI, 2010). Cascudo (1997) aponta que as taxas de varredura podem variar de 12 a 60 mV/min e intervalos de polarização que vão desde  $E_{\text{corr}}$  (ou de valores um pouco mais negativos que o  $E_{\text{corr}} - 20$  mV do  $E_{\text{corr}}$ ) até um máximo de +1,2 V, em se tratando de curvas anódicas; e desde o  $E_{\text{corr}}$  até um mínimo de -1,0 V, em se tratando de curvas catódicas.

Além do potenciostato, a técnica ainda requer a utilização de um eletrodo de trabalho (armadura a ser analisada), um eletrodo de referência (os mesmos descritos na técnica de potencial de corrosão, item 3.5.1) e um contraeletrodo (geralmente de platina ou outro material eletroquimicamente inerte, o qual é conectado ao eletrodo de trabalho, via potenciostato, por onde flui uma corrente elétrica). O fechamento do circuito se dá ionicamente pelo fluxo que se estabelece no eletrólito entre o eletrodo de trabalho e o contraeletrodo (CASCUDO, 1997). Na Figura 3.9 pode ser observada uma representação esquemática do aparato básico para o ensaio.

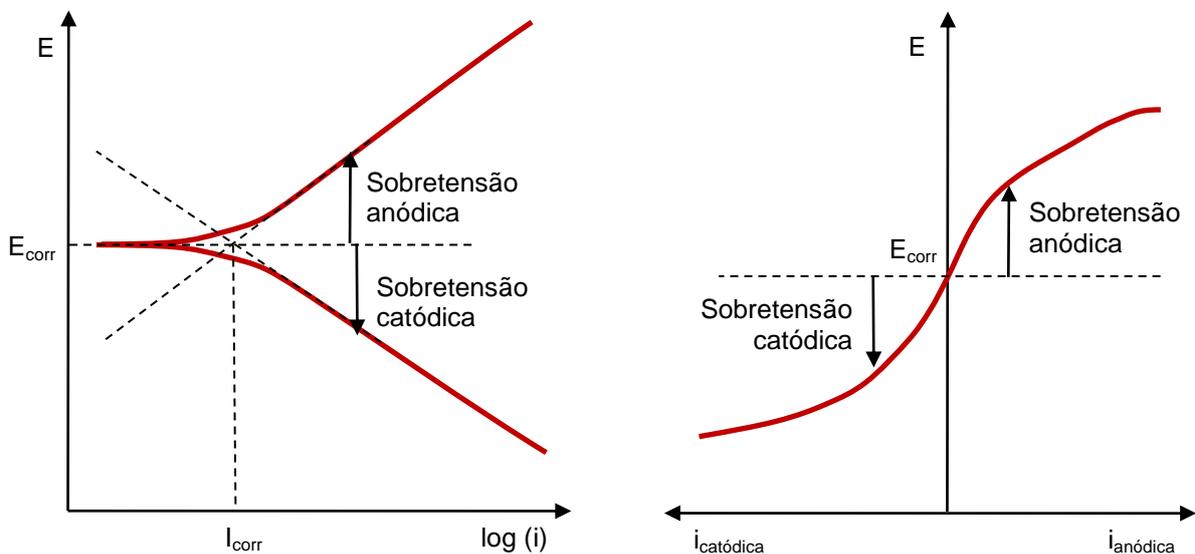
**Figura 3.9 – Dispositivo básico para determinação das curvas de polarização em meio aquoso**



(Fonte: adaptado de Cascudo, 1997)

Em geral, a curva de polarização é traçada em relação aos eixos de sobretensão versus corrente (em escala logarítmica, Figura 3.10) e se especifica em uma evolução linear, caracterizadas pelas retas de Tafel (ou extrapolação de Tafel, ou método de intersecção) anódica e catódica. Conhecida a curva de polarização, pode-se deduzir, graficamente, a velocidade de corrosão, definida a partir da extrapolação dos referidos ramos lineares, culminando na intersecção cujo par de valores coordenado é: o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e a corrente instantânea de corrosão ( $I_{corr}$ ) (BERTOLINI, 2010; CASCUDO, 1997).

**Figura 3.10 – Curvas de polarização potenciodinâmica, traçadas em escala logarítmica e linear, respectivamente**



(Fonte: Bertolini, 2010)

A sobretensão (ou sobrepotencial,  $\eta$ ) é compreendida pela diferença entre o potencial efetivo (medido) e o potencial de equilíbrio ( $E_{\text{corr}}$  ou potencial de circuito aberto), conforme verificado na Equação 4.

$$\eta = E_{\text{medido}} - E_{\text{corr}} \quad (4)$$

Quando o processo ocorre em sentido anódico, o potencial  $E_{\text{medido}}$  deve ser maior do que o  $E_{\text{corr}}$  e, portanto, a sobretensão deve ser positiva ( $\eta_{\text{anódico}} > 0$ ); já quando o processo ocorre em sentido catódico, a sobretensão deve ser negativa ( $\eta_{\text{catódico}} < 0$ ). A sobretensão ainda pode ser representada através da equação de Tafel (Equação 5), que descreve uma relação linear, tanto catódica como anódica, entre a sobretensão e o logaritmo de corrente, conforme apresentada por Bertolini (2010).

$$|\eta| = a + b \cdot \log I \quad (5)$$

A corrente instantânea de corrosão pode ser obtida pela intersecção dessas duas retas de Tafel. A relação determinada pela corrente instantânea e a área da armadura polarizada fornece a densidade de corrente, cujo parâmetro define a taxa de corrosão.

Segundo Cascudo (1997), para obtenção das curvas de Tafel, são requeridos intervalos de polarização da ordem de  $\pm 250$  a  $\pm 300$  mV em relação ao  $E_{\text{corr}}$ . Esses valores são considerados altos para polarização, o que pode implicar na destruição do eletrodo de trabalho (armadura), ou seja, após o término do ensaio, o sistema pode não retornar mais às condições eletroquímicas originais de corrosão. Desta forma, essa técnica tem uma natureza destrutiva, devendo ser aplicados apenas para investigações preliminares ou exploratórias, sobretudo utilizando corpos de prova novos para cada ensaio.

Além disso, o autor ainda aponta outras desvantagens dessa técnica, como: existência da queda ôhmica entre os eletrodos de trabalho e de referência; é um método acelerado e artificial de induzir a corrosão, podendo não reproduzir as mesmas condições de uso da estrutura; não deve ser usada para substituir estudos em longo prazo; requer profissionais especializados e o equipamento apresenta custo relativamente alto.

Entretanto, como vantagens apresentadas por essa técnica, as curvas de polarização permitem uma verificação quantitativa da cinética do processo, através da velocidade de corrosão. Além disso, essa metodologia colabora na compreensão da morfologia do ataque (generalizada ou localizada), tendências à passivação e ao pite, efeito de inibidores, películas e filmes superficiais na armadura, e desempenho de sistemas dotados de proteção catódica (CASCUDO, 1997).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados na fase experimental da pesquisa, buscando abordar os procedimentos para caracterização e análise dos materiais e dos concretos e argamassas produzidos com e sem ACBC.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizados como premissas os resultados obtidos pelas pesquisas desenvolvidas pelo autor durante a graduação, como verificado em Lima et al. (2011) e Almeida et al. (2011). Além disso, este trabalho buscou dar continuidade aos estudos apresentados por Bessa (2012).

Com base nestes trabalhos, foi possível identificar os traços de concreto com substituição de areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) que apresentaram valores satisfatórios de propriedades físicas e mecânicas. Essas misturas continham teores de 30% e 50% de ACBC em substituição (em massa) ao agregado miúdo convencional (areia natural), utilizando cimento Portland CP II E 32. Portanto, nesta pesquisa, foram adotadas as mesmas considerações de teores de ACBC, tipo de cimento e proporções de materiais utilizados nos trabalhos supracitados. Salienta-se que os autores utilizaram a nomenclatura de CBC para se referirem à ACBC e que, apesar da mudança no nome, o material permanece com as mesmas características de obtenção e utilização.

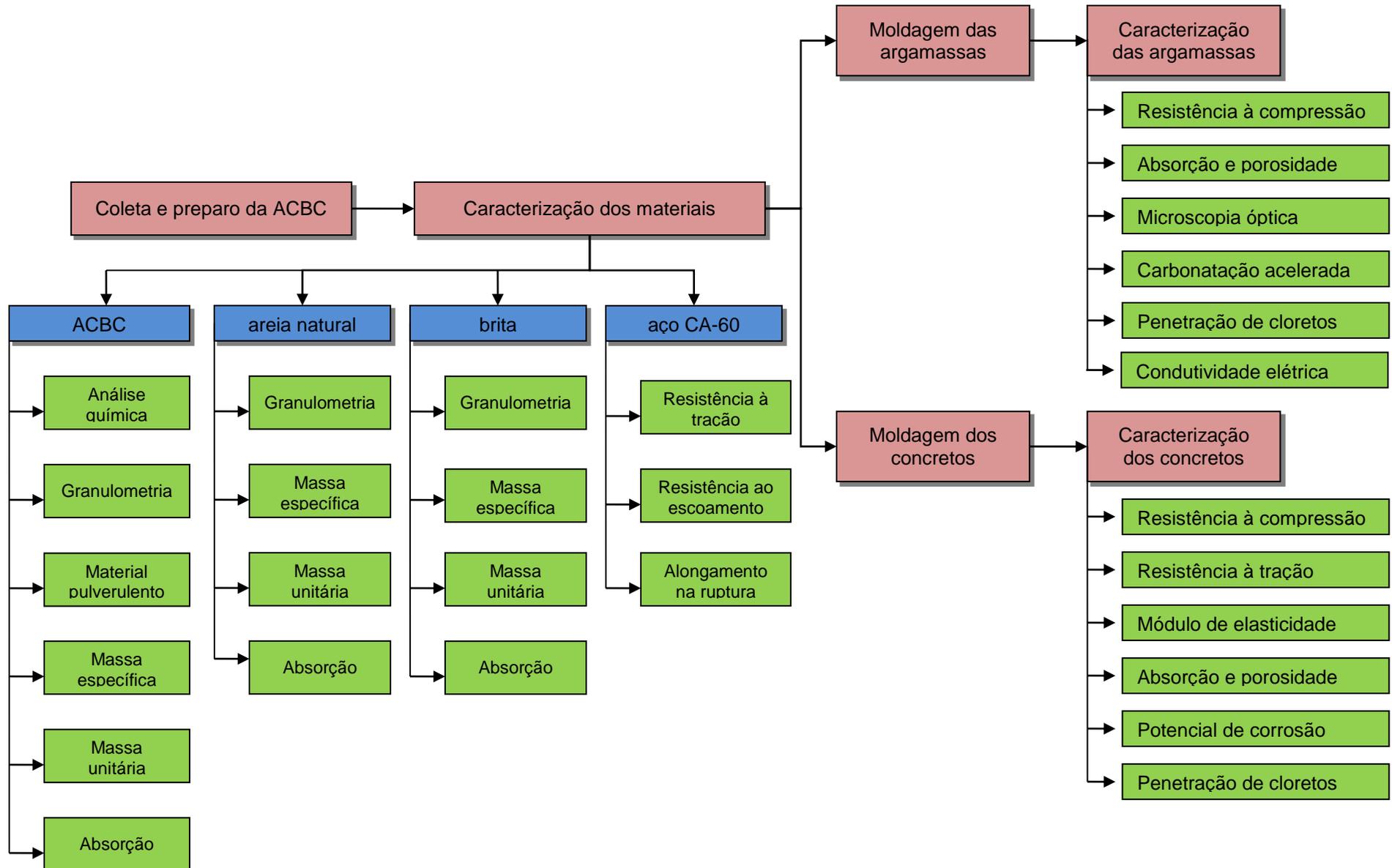
O projeto experimental da pesquisa buscou avaliar a corrosão de armaduras em concretos com substituição pela ACBC, a partir do seguinte procedimento experimental:

- a) Caracterização dos materiais utilizados;
- b) Produção de corpos de prova de argamassa para análise da porosidade, carbonatação acelerada, penetração de íons cloreto e condutividade elétrica;
- c) Produção de corpos de prova de concreto para análise da resistência mecânica e porosidade, potencial de corrosão e penetração de íons cloreto.

Após a análise desses resultados, procurou-se verificar a influência da substituição da areia natural pela ACBC na corrosibilidade de armaduras em concretos.

Na Figura 4.1 está apresentado um organograma com as principais atividades desenvolvidas no projeto experimental.

Figura 4.1 – Organograma dos procedimentos experimentais



A seguir estão discriminados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, tais como, a coleta e preparo da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), descrição dos ensaios realizados para a caracterização dos materiais e moldagem e análise das argamassas e concretos.

## 4.1 MATERIAIS

Os materiais empregados nos ensaios e na confecção dos concretos e/ou argamassas, foram: cimento Portland CII E 32; areia natural e areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), como agregados miúdos; brita basáltica, como agregado graúdo; e aço CA-60. Além disso, foram utilizados reagentes para as soluções e confecção do eletrodo de referência.

### 4.1.1 CIMENTO PORTLAND COMPOSTO

Foi utilizado cimento Portland composto com escória de alto forno (CP II E 32), da marca Tupi, cujas especificações técnicas foram apresentadas na Tabela 4.1 e estão de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1991).

**Tabela 4.1 – Propriedades físicas e químicas do cimento Portland CP II E 32**

Propriedades	Unidade	Cimento	Elementos (%)	Cimento	
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,02	PF 1000°C	4,09	
Teor escória granulada básica	%	34,0	SiO <sub>2</sub>	24,10	
Início de pega	min	197	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,42	
Fim de pega	min	279	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,08	
			CaO	52,10	
Finura	Retido #200	%	3,60	MgO	3,38
	Sup. Esp. Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4141	SO <sub>3</sub>	2,17
			Na <sub>2</sub> O	0,28	
Resistência à compressão (f <sub>ci</sub> )	3 dias	MPa	18,5	K <sub>2</sub> O	1,05
	7 dias	MPa	26,8	Anidrido carbônico – CO <sub>2</sub>	1,52
	28 dias	MPa	39,5	Resíduo Insolúvel	2,47

(Fonte: Fabricante)

Esses dados referem-se ao cimento utilizado, cuja produção se deu na Fábrica de Pedra do Sino, município de Carandaí (MG), no mês de dezembro de 2011.

#### **4.1.2 AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

A areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) foi utilizada como agregado miúdo, em substituição parcial da areia natural (teores de 30% e 50%), na produção de concretos e argamassas.

As amostras de ACBC foram coletas na usina, armazenadas e transportadas em recipientes plásticos fechados até o laboratório, onde foram preparadas, caracterizadas e, posteriormente, utilizadas nas misturas.

#### **4.1.3 AREIA NATURAL**

O agregado miúdo convencional utilizado na mistura foi a areia natural quartzosa, proveniente do Rio Mogi-Guaçú, do município de São Carlos. A caracterização do material foi apresentada no Capítulo 5. , cuja metodologia foi descrita no Capítulo 4.

#### **4.1.4 PEDRA BRITADA**

Como agregado graúdo na produção dos concretos, foi utilizada pedra britada basáltica, comercializada na cidade de São Carlos. A metodologia empregada para caracterização, bem como os resultados obtidos, serão apresentados nos capítulos seguintes.

#### **4.1.5 AÇO CA-60**

Para os ensaio de potencial de corrosão, foram utilizadas barras de aço CA-60, de 5 mm de diâmetro nominal (área da seção igual a  $19,63 \text{ mm}^2$ ). O aço longo ao carbono foi produzido pela Gerdau, para uso comercial na construção civil. Apesar do aço CA-50 ser o tipo mais utilizado na construção civil, o uso do CA-60 foi determinado pelo diâmetro da barra utilizada nos corpos de prova (PINIWEB, 2003).

#### **4.1.6 ELETRODO DE REFERÊNCIA**

Para os ensaios de potencial de corrosão, foi confeccionado um eletrodo de referência de prata/cloreto de prata, em solução saturada de cloreto de potássio (Ag/AgCl, KCl sat.). Para isso, foi necessário um fio de prata com 1,3 mm de diâmetro, reagentes para preparação da solução de KCl (descritos no item 4.1.7), um tubo de vidro com um fio de platina fundido em uma das extremidades e um recipiente para armazenamento.

#### 4.1.7 REAGENTES PARA SOLUÇÕES

Os ensaios de penetração de cloretos e potencial de corrosão utilizaram-se de solução de NaCl (cloreto de sódio) para saturação dos corpos de prova (concretos e argamassas). Para isso, foi utilizado reagente analítico de NaCl P.A., da marca Synth, com teor de pureza acima de 99%.

Para a confecção do eletrodo de referência de Ag/AgCl, foi necessária a preparação de solução saturada de cloreto de potássio (KCl). Foi utilizado KCl P.A., da marca Synth, com teor acima de 99%.

As barras de aço foram limpas com solução de ácido clorídrico (HCl) e hexametilenotetramina, e acetona. Para a primeira solução, foi utilizado reagente analítico de HCl P.A, teor entre 36,5 e 38%, da marca Synth. O reagente analítico de hexametilenotetramina (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub>) P.A., da marca Synth, apresentou pureza acima de 99%. Também foi utilizada acetona ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO) P.A. da marca Synth, com teor de pureza mínimo de 99,5%.

Para a análise de carbonatação, foi utilizado o indicador de fenolftaleína. Essa solução foi preparada com fenolftaleína (C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub>) P.A., da marca Qhemis, com teor acima de 98%. Além disso, a solução utilizou álcool isopropílico (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O) P.A. da marca Qhemis, teor acima de 99,5%, e densidade à 20°C de 0,784-0,787 g/ml.

A solução de nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>) foi utilizada para análise da penetração de cloretos nos corpos de prova. Utilizou-se AgNO<sub>3</sub> P.A., da marca Synth, com teor mínimo de 99%.

#### 4.1.8 ÁGUA

Foi utilizada água potável para produção de concretos e argamassas, proveniente de poços existentes na UFSCar, campus São Carlos.

Para o preparo das soluções, utilizou-se água destilada e deionizada, obtida por meio de destilador por osmose reversa.

## 4.2 MÉTODOS

A seguir, apresenta-se uma descrição dos métodos empregados para coleta e preparo da ACBC, caracterização das matérias-primas utilizadas, procedimento de moldagem e cura de corpos de prova de concretos e argamassas, bem como os experimentos e análises realizadas.

#### 4.2.1 COLETA E PADRONIZAÇÃO DA ACBC

As amostras de areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar foram coletadas no mês de agosto de 2011, na Usina Diamante, do grupo COSAN, localizada no município de Jaú (SP). Esta usina foi escolhida com base nos estudos apresentados por Sales & Lima (2010), onde compararam as características físicas e químicas de amostras de ACBC de quatro usinas do Estado de São Paulo, a um raio máximo de 100 km do município de São Carlos (SP). As amostras da Usina Diamante obtiveram os melhores resultados na análise da proposta de substituição da ACBC como agregado miúdo.

De acordo com Bessa (2011), a colheita da cana na Usina Diamante é feita, anualmente, nos meses de abril a novembro, sendo que 30% é realizada de forma mecanizada e, 70%, manual. A usina é produtora de açúcar e etanol, cujo processamento médio de cana é da ordem de 8 toneladas/dia. A queima do bagaço da cana-de-açúcar se dá a uma temperatura entre 750 e 800°C, e umidade variando entre 47 e 50%.

O procedimento da coleta da ACBC na usina se deu da seguinte maneira: durante a limpeza das caldeiras, com uma pá, a areia de cinza residual foi retirada por um funcionário da empresa. Devido à alta temperatura em que se encontravam, as amostras de areia de cinza foram deixadas esfriando ao ar livre, lentamente, até que o seu manuseio fosse possível. Em seguida, as amostras foram armazenadas em caixas plásticas (Figura 4.2), vedadas e transportadas até o Laboratório de Materiais e Componentes (LMC – UFSCar).

**Figura 4.2 – Coleta da ACBC na usina**



(Fonte: próprio autor)

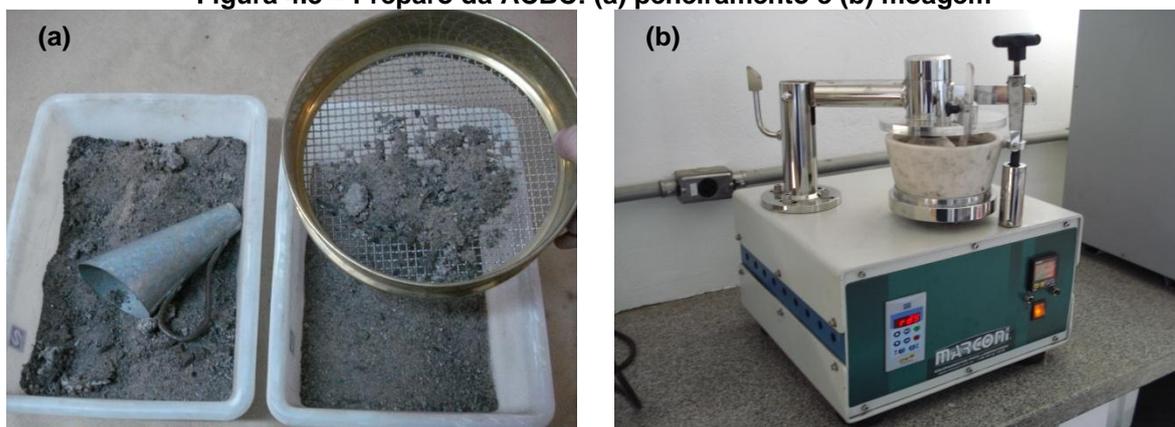
Usualmente, após a limpeza das caldeiras, a ACBC é retirada e estocada em montes ao ar livre até a sua disposição final como adubo nas lavouras de cana-de-açúcar, juntamente com a torta de filtro e a vinhaça.

Neste procedimento de remoção do resíduo, a areia de cinza se apresenta com uma granulometria heterogênea e uma quantidade considerável de impurezas. Isso se deve ao fato de, adicionalmente à grande quantidade de areia presente no bagaço, a ACBC apresenta, em sua composição, gravetos, folhas, pedriscos, torrões de madeira e bagaços derivados da combustão incompleta, além de resíduos provenientes da colheita da cana, como pedaços de aço e de arame cozido.

No laboratório (LMC – UFSCar), as amostras foram, portanto, preparadas a fim de padronizá-las para a aplicação em matrizes de concretos e argamassas. O procedimento de padronização da ACBC foi o mesmo definido por Sales & Lima (2010).

As amostras de areia de cinza foram secas em estufa a  $105 \pm 5$  °C e passadas, manualmente, em peneiras de abertura de 4,75 mm. Em seguida, o material passante na peneira foi submetido à moagem em moinho tipo pistilo-almofariz, da marca Marconi, rotação de 65 rpm, durante três minutos, para uniformização do agregado. Cada ciclo de moagem foi dado com amostras de 150 gramas. O processo de peneiramento e moagem da ACBC pode ser observado na Figura 4.3.

**Figura 4.3 – Preparo da ACBC: (a) peneiramento e (b) moagem**



(Fonte: próprio autor)

A diferença entre as amostras de ACBC, antes e depois de serem submetidas à padronização, pode ser verificada na Figura 4.4.

**Figura 4.4 – Antes e depois da padronização da ACBC, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

Nota-se que o material graúdo foi totalmente removido por meio dos procedimentos de peneiramento e moagem da ACBC. A ACBC padronizada foi utilizada, portanto, como substituta da areia natural na moldagem de corpos de prova de argamassas e concretos.

#### **4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

Para a produção dos concretos e argamassas, foi caracterizada a ACBC utilizada como agregado miúdo, bem como os agregados convencionais (areia e brita) e as barras de aço CA-60.

##### **a) Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC)**

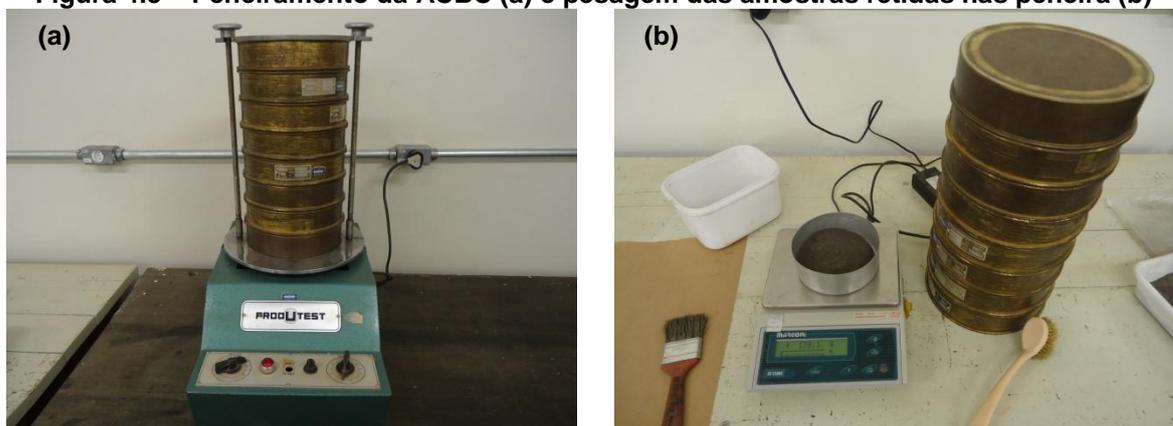
A ACBC foi submetida à caracterização química e física, sendo realizadas as seguintes análises: composição química, composição granulométrica, material pulverulento, massa específica, massa unitária no estado seco e solto, volume de vazios e absorção de água. Com exceção da análise química, os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar).

A determinação da composição química foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas, da Universidade Federal do Paraná (LAMIR-UFPR). Utilizou-se uma análise química semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X, por meio de um espectrômetro da marca Philips PW 2400. O ensaio foi realizado com dois tipos de amostras: ACBC *in natura* e ACBC padronizadas. O intuito desta análise foi verificar se o processo de padronização da ACBC poderia provocar alguma alteração em sua composição química.

As análises subsequentes foram realizadas apenas com a ACBC padronizada.

O ensaio de granulometria da ACBC foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando amostras secas de 500g. A sequência de peneiras utilizadas seguiu as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009), cujas aberturas das malhas, em milímetros, foram: 6,3; 4,75; 2,36; 1,18; 0,60; 0,30 e 0,15. As amostras foram agitadas mecanicamente por 10 minutos, e a massa dos materiais retidos em cada peneira foi determinada. Com os resultados, foi possível definir a dimensão máxima, módulo de finura e a curva granulométrica da ACBC. Pode ser verificado na Figura 4.5 a sequência de peneiras no agitador mecânico com a ACBC, bem como a determinação da massa retida em cada peneira.

**Figura 4.5 – Peneiramento da ACBC (a) e pesagem das amostras retidas nas peneira (b)**



(Fonte: próprio autor)

Esse procedimento serviu para caracterização da granulometria da ACBC padronizada. Para a distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado nos concretos e argamassas com o resíduo, a NBR 7211 (ABNT, 2009) define que, quando o agregado for composto ou derivado de duas ou mais origens, a granulometria deve ser analisada proporcionalmente à presença de cada um deles na mistura. Desta forma, a análise granulométrica do agregado miúdo utilizado nas misturas seguiu as composições: areia mais 30% de ACBC (em massa), e areia mais 50% de ACBC (em massa).

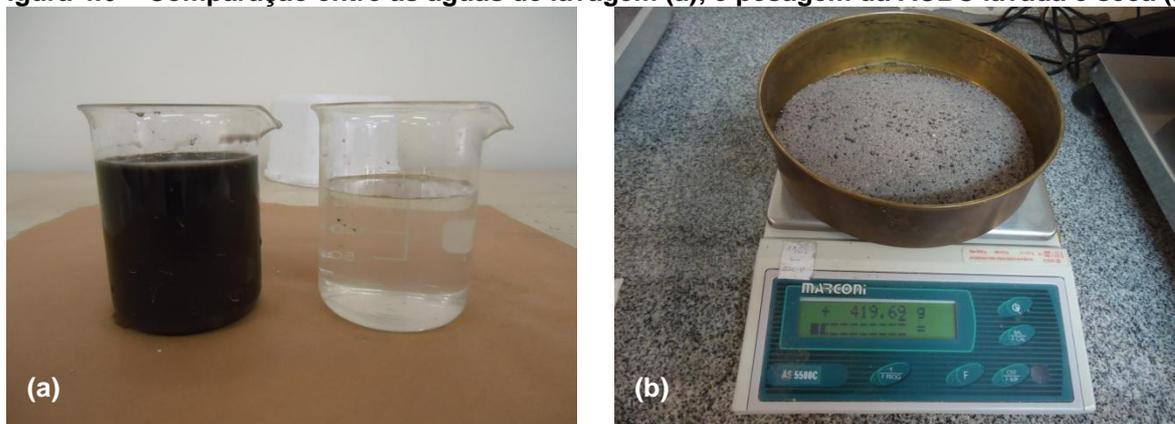
A quantidade de material pulverulento foi obtida seguindo as recomendações da NBR NM 46 (ABNT, 2001). As amostras de 500 g de ACBC seca foram colocadas em recipientes separados. Os recipientes foram preenchidos com água e agitados vigorosamente. Esse material (água + ACBC) foi passado na peneira de malha 75  $\mu\text{m}$ . O procedimento foi repetido até que a água de lavagem apresentasse, por comparação, uma coloração clara. O material retido na peneira foi seco em estufa a  $105 \pm 5$  °C. A

determinação do material pulverulento, em porcentagem, foi dada pela relação de material fino que passa através da peneira 75  $\mu\text{m}$ , por lavagem (massa seca inicial,  $m_i$ , menos massa seca final,  $m_f$ , após a lavagem) e a massa seca inicial, multiplicada por 100 (Equação 6).

$$m_{\#75\mu\text{m}} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (6)$$

A Figura 4.6a permite observar a diferenciação de cores da primeira água de lavagem da ACBC com a última. Além disso, pode ser observado na Figura 4.6b o aspecto da ACBC lavada e seca ao final do ensaio.

**Figura 4.6 – Comparação entre as águas de lavagem (a), e pesagem da ACBC lavada e seca (b)**

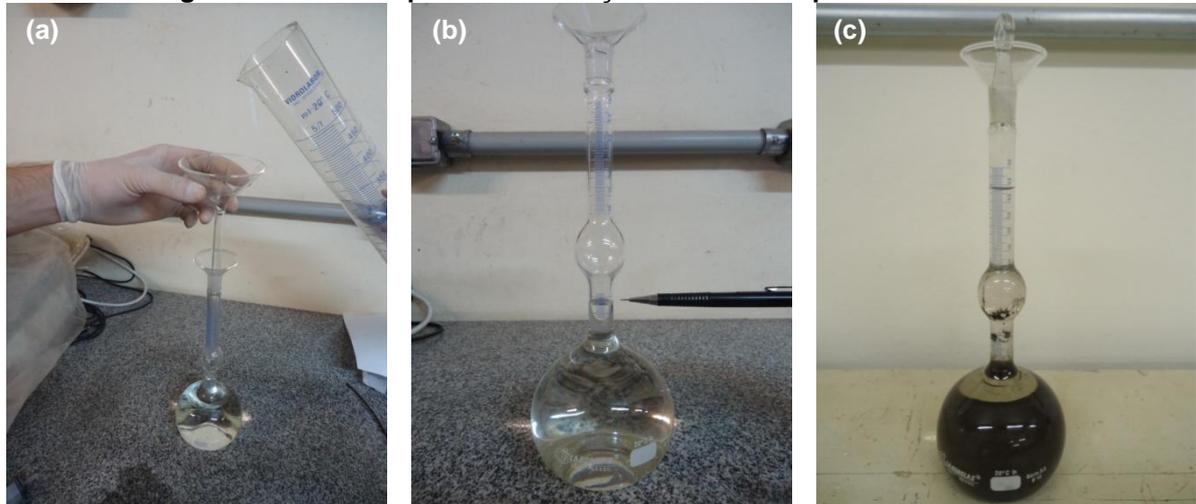


(Fonte: próprio autor)

A massa específica foi determinada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2000). A norma para determinação da massa específica de agregados miúdos (NBR NM 52, 2009) define que ela deve ser aplicada para materiais que ficam retidos, quase em sua totalidade, na peneira de abertura 75  $\mu\text{m}$ . Pelo ensaio realizado com base na NBR NM 46 (ABNT, 2001), verificou-se que a quantidade do material fino de ACBC que ficou retido na peneira 75 $\mu\text{m}$ , por lavagem, foi de 16,2%. Esse resultado foi considerado significativo (acima de 10%) fazendo com que a massa específica do resíduo fosse determinada por meio da NBR NM 23 (ABNT, 2000), para materiais em pó. Desta forma, o procedimento seguido foi: pesou-se 1 kg de ACBC seca em um recipiente. Em um frasco de *Le Chatelier* foi adicionado querosene e verificado o volume inicial ( $V_i$ ) (Figura 4.7a,b). Adicionou uma quantidade da amostra separada de ACBC até a marca indicada no frasco e agitou cuidadosamente o conjunto. Em seguida, verificou a massa utilizada para o deslocamento

do líquido (massa inicial ( $m_i$ ) menos a massa restante ( $m_f$ ) no recipiente) e o volume final ( $V_f$ ) no frasco (Figura 4.7c).

**Figura 4.7 – Ensaio para determinação da massa específica da ACBC**



(Fonte: próprio autor)

O valor da massa específica foi determinado, em  $\text{g/cm}^3$ , pela relação entre a massa de ACBC utilizada e o deslocamento de líquido verificado, conforme apresentada na Equação 7.

$$\rho = \frac{m_i - m_f}{V_f - V_i} \quad (7)$$

A massa unitária no estado seco e solto e o volume de vazios do agregado foram determinados conforme especificado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006), método C. A primeira pode ser definida pela relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume do recipiente. O volume de vazios é definido pelo espaço entre os grãos de uma massa de agregado. Para essas verificações utilizou-se um recipiente normalizado, com volume aferido de 2,98 L, de dimensões 154 x 160 mm, para diâmetro interno e altura, respectivamente. O agregado seco foi lançado a 50 mm acima da borda do recipiente e nivelado com a mesma. A relação da massa obtida no preenchimento do recipiente e o volume desse recipiente determinaram o valor da massa unitária, em  $\text{kg/m}^3$  (Figura 4.8).

**Figura 4.8 – Determinação da massa unitária da ACBC no estado seco e solto**



(Fonte: próprio autor)

O índice de vazios foi calculado, em porcentagem, pela Equação 8, onde  $d_1$  é a massa específica do agregado seco,  $\rho_w$  é a massa específica da água e  $\rho_{ap}$  é a massa unitária do agregado.

$$E_v = 100 * \frac{[(d_1 * \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 * \rho_w} \quad (8)$$

A absorção de água da ACBC foi determinada pela NBR NM 30 (ABNT, 2001). A absorção é definida pelo incremento de massa devido à penetração de água nos poros permeáveis do agregado, em relação a sua massa em estado seco. Para isso, deixou-se uma amostra de 1 kg de ACBC em um recipiente com água, por 24 horas. A amostra saturada foi levada a uma corrente de ar quente a fim de que retirar a água sobre a superfície dos grãos. O ponto de saturação com superfície seca do agregado foi determinado pela compactação (25 golpes com soquete) do mesmo em um tronco cônico, seguindo da retirada do molde e desmoronamento do material compactado (Figura 4.9). A massa da ACBC no estado saturado com superfície seca foi verificada e levada para secagem em estufa a  $105 \pm 5$  °C até a constância de massa.

**Figura 4.9 – ACBC no estado saturado com superfície seca**



(Fonte: próprio autor)

O valor da absorção de água obtido pelo ensaio foi a relação da massa do agregado saturado com superfície seca ( $m_{sat}$ ) menos a massa seca ( $m_s$ ) e a massa seca do agregado, em porcentagem (Equação 9).

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (9)$$

#### **b) Areia natural**

A areia natural foi caracterizada pela composição granulométrica, massa específica, massa unitária no estado seco e solto e absorção de água. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar), e eles foram baseados nos mesmos procedimentos adotados para a caracterização da ACBC, com exceção da massa específica.

A determinação da massa específica seguiu as recomendações da NBR NM 52 (ABNT, 2009), e foi obtida através da relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Preparou-se uma amostra de areia em estado saturado com superfície seca, conforme procedimento realizado no ensaio de absorção de água pela NBR NM 30 (ABNT, 2009). Uma quantidade de 500 g desta amostra preparada foi separada e colocada em um frasco aferido de 500 mL. No conjunto, foi então adicionado água até a marca de 500 cm<sup>3</sup>, e, posteriormente, determinada a massa seca da amostra utilizada. O valor da massa específica do agregado obtida no ensaio, em g/cm<sup>3</sup>, foi determinado pela relação entre a massa seca e a diferença do volume do frasco e o volume de água adicionada ao frasco.

### c) Pedra britada

A brita utilizada como agregado graúdo foi caracterizada pela composição granulométrica, massa específica, massa unitária no estado seco e solto, massa unitária compactada e absorção de água. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar).

O ensaio de granulometria do agregado graúdo seguiu as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram agitadas amostras de 5 kg em peneirador mecânico, utilizando a seguinte série de peneiras, com aberturas em milímetros: 37,5; 25; 19; 12,5; 9,5; 6,3 e 4,75. Pode ser verificado na Figura 4.10 o agitador mecânico e o conjunto de peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria do agregado graúdo.

**Figura 4.10 – Ensaio de granulometria da pedra britada**



(Fonte: próprio autor)

A análise da granulometria da pedra britada se deu conforme indicações da NBR 7211 (ABNT, 2009), por meio dos resultados de dimensão máxima, módulo de finura e a curva granulométrica do agregado.

A massa específica e a absorção do agregado foram determinadas conforme especificações da NBR NM 53 (ABNT, 2002). Foram utilizadas amostras de pedra britada retidas na peneira de 4,75 mm, seguindo da sua lavagem e secagem em estufa a  $105 \pm 5$  °C até a constância de massa. O ensaio prosseguiu com a separação de amostras de 3 kg. Elas foram deixadas submersas em água por 24 horas. Em seguida, foram pesadas em

estado saturado com superfície seca e submergido. As amostras foram levadas para serem secas em estufa até a obtenção de massa constante. A determinação da massa específica, em  $\text{g}/\text{cm}^3$ , se deu pela relação entre a massa seca e a diferença da massa saturada menos a massa imersa em água. A absorção do agregado, em porcentagem, foi obtida pela relação de massa de água (massa saturada menos massa seca) e massa seca, multiplicada por 100.

As massas unitárias, compactada e no estado seco e solto, foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para a primeira, seguiu-se o método A, onde o agregado seco foi adicionado no recipiente normalizado em três camadas, compactando cada camada com 25 golpes. A massa unitária no estado seco e solto foi determinada conforme o procedimento definido pelo método C da norma (já descrito no “item a”. A unidade definida por norma de ambas as propriedades foi  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

#### **d) Aço CA-60**

Para caracterização do aço CA-60, foi realizado o ensaio de tração das barras utilizadas, utilizando quatro amostras de 20 cm de comprimento, com base nas especificações da NBR 7480 (ABNT, 2007). A experimentação foi realizada no Laboratório de Propriedades Mecânicas de Metais, do Departamento de Engenharia de Materiais (UFSCar), por meio do equipamento INSTRON 5500R e o software INSTRON Bluehill. A velocidade de alongamento das barras no equipamento se deu em 2,0 mm/min (Figura 4.11).

**Figura 4.11 – Ensaio de tração das barras de aço CA-60**



(Fonte: próprio autor)

Com a realização do ensaio, foi possível determinar a resistência do aço à ruptura, a resistência de escoamento e o alongamento na ruptura. A resistência de escoamento das barras foi determinada pelo diagrama tensão-deformação correspondente à deformação permanente de 0,2%.

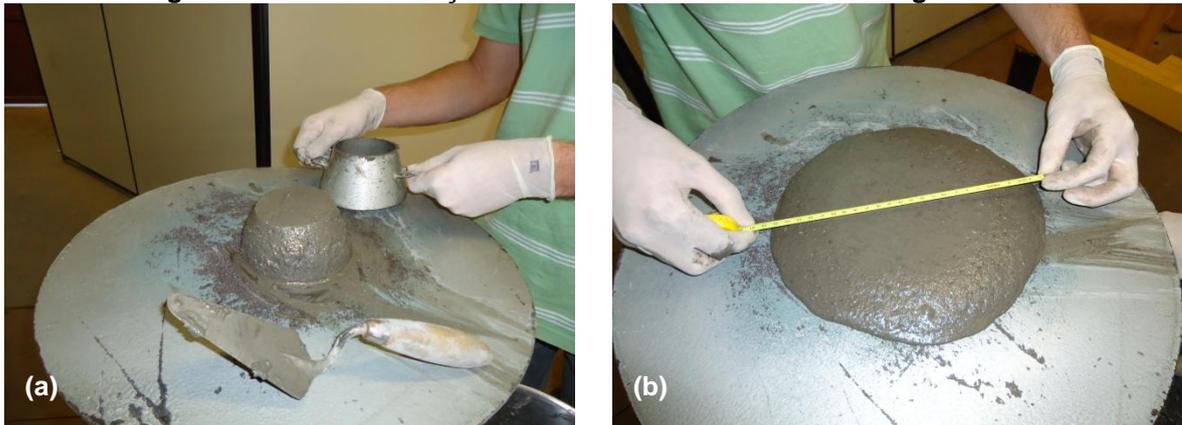
#### **4.2.3 MOLDAGEM E CURA DAS ARGAMASSAS**

A moldagem e cura dos corpos de prova das argamassas foram realizadas no Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar). Para a produção de argamassas foram utilizados três traços diferentes, definidos a partir dos teores de ACBC: 0% (referência), 30% e 50%, em massa, em substituição da areia natural. A proporção dos materiais utilizada em cada traço foi determinada pelo teor de argamassa dos concretos estudados por Bessa (2012), utilizando cimento Portland CP II E 32, com o intuito de caracterizar a sua matriz.

Com base neste estudo, o teor de argamassa foi definido em 51,30%, na proporção de 1 : 2,01 (cimento : agregado miúdo), em massa. A relação água/cimento (a/c) foi ajustada para se obter um índice de consistência padrão de  $255 \pm 10$  mm, fixado para todos os traços, a fim de propiciar uma trabalhabilidade adequada para a moldagem das argamassas. Esses limites do índice de consistência foram propostos pela NBR 13276 (ABNT, 1995) e utilizados por Bezerra e outros (2011).

Deste modo, o índice de consistência foi determinado conforme orientações da NBR 13276 (ABNT, 1995). A argamassa foi preparada e utilizada para encher um molde tronco cônico de dimensões 125 x 80 x 65 mm (diâmetro da base, diâmetro do topo e altura, respectivamente), colocado de modo centralizado sobre a mesa para índice de consistência. O molde foi preenchido com três camadas sucessivas e adensadas com 15, 10 e 5 golpes de soquete, para a primeira, segunda e terceira camada, respectivamente, a fim de distribuir uniformemente a argamassa no molde. A massa foi nivelada com a borda superior e o molde foi retirado (Figura 4.12a). Em seguida a manivela foi acionada, de modo que a mesa subisse e caísse 30 vezes, em um período de 30 segundos de maneira uniforme. O índice de consistência foi obtido pelo diâmetro final da argamassa espalhada sobre a mesa (Figura 4.12b).

**Figura 4.12 – Determinação do índice de consistência das argamassas**



(Fonte: próprio autor)

Com a quantidade de água definida pelo índice de consistência, as proporções dos materiais (em massa) utilizados para o preparo das argamassas foram apresentadas na Tabela 4.2, bem como o índice de consistência alcançado para cada traço.

**Tabela 4.2 – Relação dos materiais utilizada para cada traço de argamassa**

Traço/ nomenclatura	Teor de ACBC	Proporção dos materiais (em massa)				Consistência (mm)
		Cimento	Areia	ACBC	Água	
AR	0%	1,000	2,010	-	0,42	250±10
A30	30%	1,000	1,407	0,603	0,44	251±10
A50	50%	1,000	1,005	1,005	0,47	258±10

Com a relação dos materiais e a consistência das argamassas definidas, foram moldados corpos de prova cilíndricos, de dimensões 50 x 100 mm (diâmetro x altura), segundo recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996). Os materiais (cimento, areia natural, ACBC e água) foram misturados em um misturador mecânico, com três velocidades, até a obtenção de uma massa homogênea. Os moldes cilíndricos foram untados com óleo e preenchidos com argamassa em quatro camadas, sendo que cada camada recebeu 30 golpes de soquete normal para adensá-las (Figura 4.13a). A massa foi nivelada com a borda superior do molde e vedada com plástico a fim de evitar a perda de água destinada à hidratação do cimento. Depois de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 4.13b).

**Figura 4.13 – Moldagem dos corpos de prova de argamassas**

(Fonte: próprio autor)

Após a desforma, os corpos de prova foram capeados com argamassa (apenas aqueles destinados ao ensaio de compressão simples) e levados para câmara úmida, com umidade relativa de  $95\% \pm 5\%$ , onde ficaram em processo de cura por 28 dias.

#### 4.2.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS

Os corpos de prova de argamassas foram submetidos ao ensaio de compressão simples para determinação da resistência à compressão aos 28 dias. O ensaio seguiu as recomendações da NBR 7215 (1996) e foi realizado no Laboratório de Construção Civil, do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, da Universidade de São Paulo (LCC-IAUSC-USP), como observado na Figura 4.14. Foram ensaiadas quatro amostras de cada traço, totalizando 12 corpos de prova.

**Figura 4.14 – Ensaio de resistência à compressão das argamassas**

(Fonte: próprio autor)

Para a realização do ensaio de ruptura, posicionou-se o corpo de prova no centro do prato inferior da prensa e aplicou-se uma carga de compressão sobre o mesmo a uma velocidade média de 0,25 MPa/s. A resistência à compressão da argamassa foi obtida pela relação da carga de ruptura e a área circular do corpo de prova cilíndrico.

#### 4.2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS

Para a caracterização dos índices físicos das argamassas, foram verificadas as propriedades de absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, segundo a NBR 9778 (ABNT, 1987). Para cada traço, foram moldados cinco corpos de prova. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar).

Os corpos de prova foram secos em estufa a  $105 \pm 5$  °C, por 72 horas e determinada a sua massa seca ( $m_s$ ). Em seguida, foram resfriados em ar seco até a temperatura ambiente, e colocados submersos em um recipiente com água por 72 horas. Essa imersão em água se deu em três fases: nas primeiras 4 horas, foram deixados 1/3 da altura do corpo de prova submerso; nas 4 horas seguintes, a amostra ficou com 2/3 de seu volume debaixo d'água; e, completamente imerso nas 64 horas restantes. Após a saturação das amostras, foram determinadas a massa saturada com superfície seca ( $m_{sat}$ ) e a massa saturada imersa em água ( $m_i$ ) de cada corpo de prova.

A absorção de água da argamassa foi obtida pela relação entre a massa de água presente nos poros após a saturação e a massa seca da amostra. Ela pode ser obtida, em porcentagem, pela Equação 10.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (10)$$

A porosidade da argamassa foi determinada, em porcentagem, pelo índice de vazios, a partir da relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total, sendo calculada pela Equação 11.

$$I. V. = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s - m_i} * 100 \quad (11)$$

A massa específica da argamassa também foi obtida pelo ensaio, definida em g/cm<sup>3</sup> pela Equação 12.

$$\rho = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (12)$$

#### 4.2.6 MICROSCOPIA ÓPTICA DOS POROS DA ARGAMASSA

A análise consistiu na verificação dos diâmetros médios dos poros de argamassa por microscopia óptica. Essa análise foi realizada no Grupo de Materiais Eletroquímicos e Métodos Eletroanalíticos (GMEME) do Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. Para isso, foi utilizado o equipamento Hirox Digital Microscope KH-7700 (Figura 4.15) capaz de promover um aumento de até 3.500 vezes.

**Figura 4.15 – Equipamento utilizado para a microscopia óptica dos poros da argamassa**



(Fonte: próprio autor)

Foram analisados corpos de prova de argamassa (AR, A30 e A50), após 28 dias de cura úmida, e secagem em estufa a  $50 \pm 5$  °C por 7 dias. As aproximações foram obtidas sobre a superfície da argamassa por meio da variação da distância focal do equipamento.

A técnica de microscopia óptica se mostrou adequada para explicar o efeito da variação da permeabilidade das argamassas, pela distribuição e tamanho relativo dos poros, com e sem incorporação de ACBC.

#### 4.2.7 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado com corpos de prova cilíndricos de argamassa, na câmara de carbonatação do Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar).

A escolha da análise com amostras de argamassa foi devido à tentativa de minimizar a influência do agregado graúdo no concreto na determinação da profundidade de carbonatação, conforme verificado por Pauletti e outros (2007). O agregado graúdo atua como uma barreira para a penetração do CO<sub>2</sub> na matriz de argamassa, fazendo com que a frente carbonatada em concretos seja inferior àquela verificada em argamassas, de acordo com análise feita por Kulakowski (2002). Além disso, a medida da profundidade de carbonatação acaba sendo dificultada devido à heterogeneidade da massa do concreto proporcionada pela presença da brita. Desta forma, os resultados apresentam maiores índices de variação, diminuindo a confiabilidade nos ensaios, conforme já verificado em estudos preliminares (ALMEIDA et al., 2011). Pauletti e outros (2007) ainda citaram o fato de que, ao usar corpos de prova de argamassas, estes podem apresentar dimensões menores do que se fossem feitos de concreto, levando a uma demanda de material menor para produzi-los e possibilitando a disposição de mais corpos de prova no interior da câmara de carbonatação.

Para o ensaio, optou-se pela forma cilíndrica dos corpos de prova de argamassa, pois estes podem apresentar profundidades de carbonatação superiores àquelas verificadas em corpos de prova prismáticos. Isso ocorre porque a difusão do CO<sub>2</sub> ocorre no sentido radial dos corpos de prova, e pode ocorrer a soma de vetores na difusão do gás. Ou seja, para um mesmo material, com as mesmas condições de exposição, corpos de prova cilíndricos apresentam frentes de carbonatação maiores do que corpos de prova prismáticos (KULAKOWSKI, 2002).

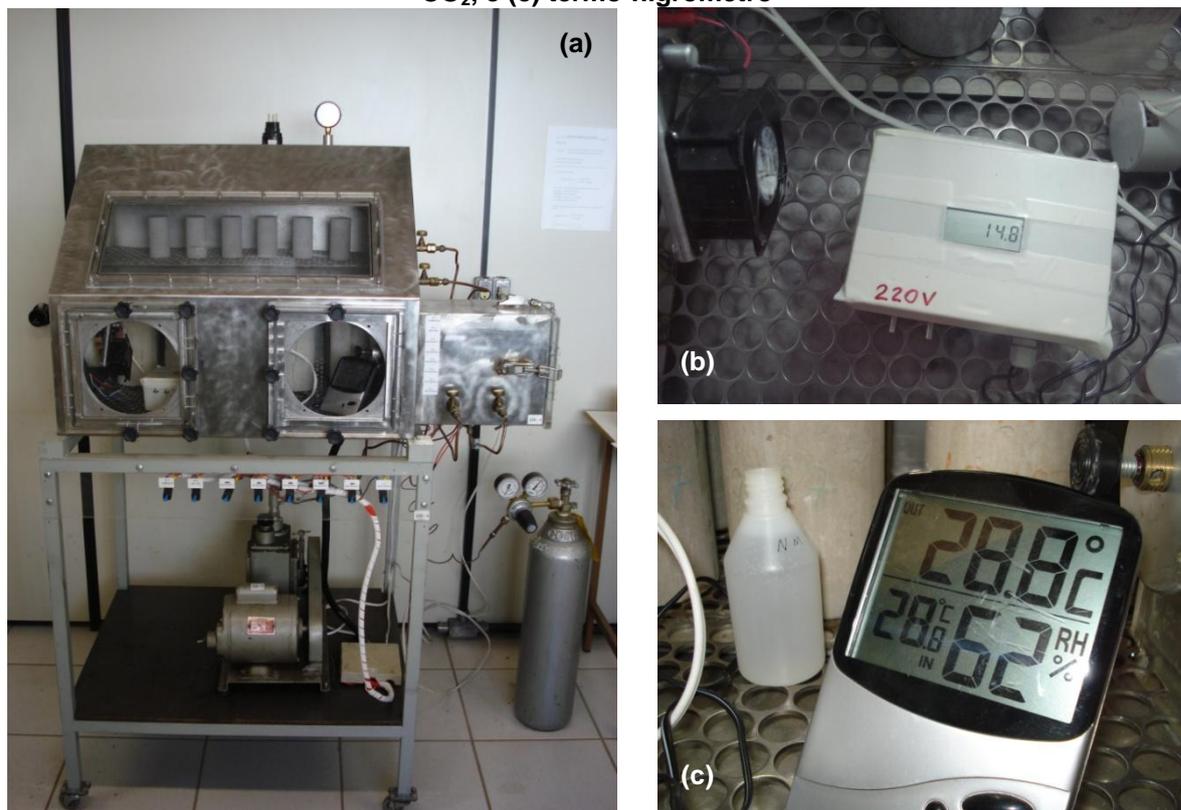
A câmara de carbonatação utilizada foi com alimentação periódica, não automática, desenvolvida pelo próprio grupo de pesquisa<sup>2</sup>. A câmara consistiu em uma caixa de aço inoxidável de 240 L, com visor e portas em acrílico. Dentro da câmara, foram posicionados duas ventoinhas a fim de distribuir de maneira uniforme o gás contido em seu interior. A alimentação foi realizada com um cilindro de CO<sub>2</sub> conectada à câmara através de solenóides. O controle do teor do gás no interior da câmara foi feito com auxílio de um sensor de CO<sub>2</sub> da marca Tecnovip, que mede teores acima de 100.000 ppm, e precisão de 0,1%. Além do CO<sub>2</sub>, a umidade relativa e a temperatura interna também foram monitoradas com um termo-higrômetro.

A câmara de carbonatação utilizada para o experimento pode ser observada na Figura 4.16, bem como o sensor de CO<sub>2</sub> e o termo-higrômetro utilizados para o monitoramento das condições no interior da câmara.

---

<sup>2</sup> GESEC – Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana, Laboratório de Materiais e Componentes, Universidade Federal de São Carlos.

Figura 4.16 – Ensaio de carbonatação acelerada: (a) câmara de carbonatação, (b) sensor de CO<sub>2</sub>, e (c) termo-higrômetro



(Fonte: próprio autor)

Com base em estudos preliminares, verificou-se a necessidade de aferição diária do teor de CO<sub>2</sub> no interior da câmara, padronizando a alimentação em 5% a cada 12 horas. Esta perda de manutenção da concentração do CO<sub>2</sub> pode ter sido pela penetração do gás nos corpos de prova em análise e por possíveis vazamentos que ocorria na câmara durante a realização do experimento.

O teor de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) presente na câmara de carbonatação foi determinado pelo máximo valor possível verificado na bibliografia sem que houvesse prejuízo na microestrutura da argamassa. Em estudo realizado por Pauletti e outros (2007), foi constatado que vários pesquisadores recomendaram percentuais de CO<sub>2</sub> inferiores a 20% pois, em concentrações elevadas, próximas à saturação, pode ocorrer a formação, nas argamassas, de compostos diferentes daqueles encontrados em situações reais em ambientes naturais. A determinação por esta máxima de concentração de CO<sub>2</sub> também foi influenciada pelo tempo disponível para a realização do experimento.

Neste sentido, foi definido para o ensaio que, para uma concentração máxima permitida de CO<sub>2</sub>, considerando o desempenho da câmara de carbonatação disponível, trabalhou-se com um teor de CO<sub>2</sub> de 15 ± 5%.

A umidade relativa no interior da câmara também foi definida a partir de estudos realizados por Kulakowski (2002) e Pauletti e outros (2007). A primeira autora afirma que a difusão do  $\text{CO}_2$  em meio líquido – corpos de prova saturados – é cerca de  $10^4$  vezes menor do que em meio gasoso. Por outro lado, em amostras completamente secas também não se verifica o fenômeno da carbonatação já que inexistente um meio aquoso ou um eletrólito que permita a dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e do  $\text{CO}_2$  gasoso, permitindo a carbonatação propriamente dita. Desta forma, Pauletti e outros (2007) indicam valores de umidade relativa entre 50% e 85%. Estes limites foram os adotados na experimentação, sendo colocadas amostras de sílica gel no interior da câmara para ajuste e controle da umidade.

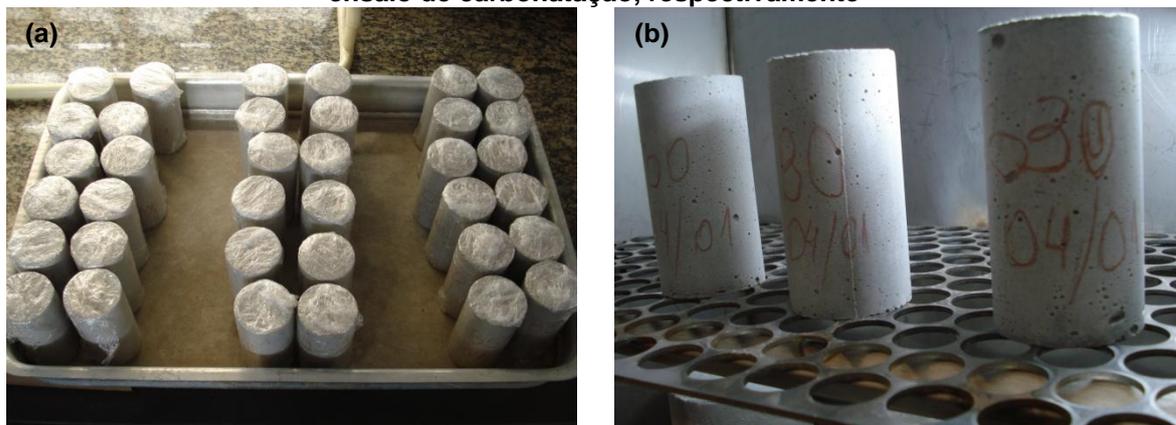
Foi considerada a temperatura ambiente no interior da câmara, já que esta propriedade não provoca influência significativa em ensaios de carbonatação acelerados, quando conduzidos sob temperaturas habituais (KULAKOWSKI, 2002; PAULETTI et al., 2007).

Após a cura em câmara úmida, iniciou-se o período de pré-condicionamento (sazonamento) dos corpos de prova de argamassa a fim de padronizar a umidade e temperatura das amostras antes do ensaio. Após os 28 dias de cura, os corpos de prova foram levados para secagem em estufa a  $50 \pm 5$  °C por 7 dias, até a constância de massa (completamente secos). Esta temperatura foi utilizada por Wolf (2010) para evitar a fissuração excessiva que pode ocorrer quando o corpo de prova é seco em estufa a 100 °C durante muito tempo. Em seguida, as amostras foram deixadas, por 5 dias, em câmara seca climatizada a  $23 \pm 1$  °C e  $60\% \pm 5\%$  de umidade relativa, para padronização das amostras a temperatura e umidade relativa ambiente.

Em seguida, todos os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação acelerada. As amostras foram condicionadas até as idades de ensaio, definidas em 7, 14, 28, 56 e 84 dias. Para cada idade de análise, foram confeccionados dois corpos de prova de cada traço (AR, A30 e A50), totalizando um conjunto de 30 amostras dentro da câmara no início do condicionamento. A câmara apenas era aberta para retirada dos corpos de prova nas idades de ensaio, garantindo, assim, que o conjunto de amostras fosse submetido à mesma condição de aceleração, sem que houvesse variações de ambiente durante o condicionamento.

Os corpos de prova de argamassa no período de pré-condicionamento e submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada, com teor de  $15 \pm 5\%$  de  $\text{CO}_2$ , e umidade relativa entre 50% e 85%, podem ser verificados na Figura 4.17.

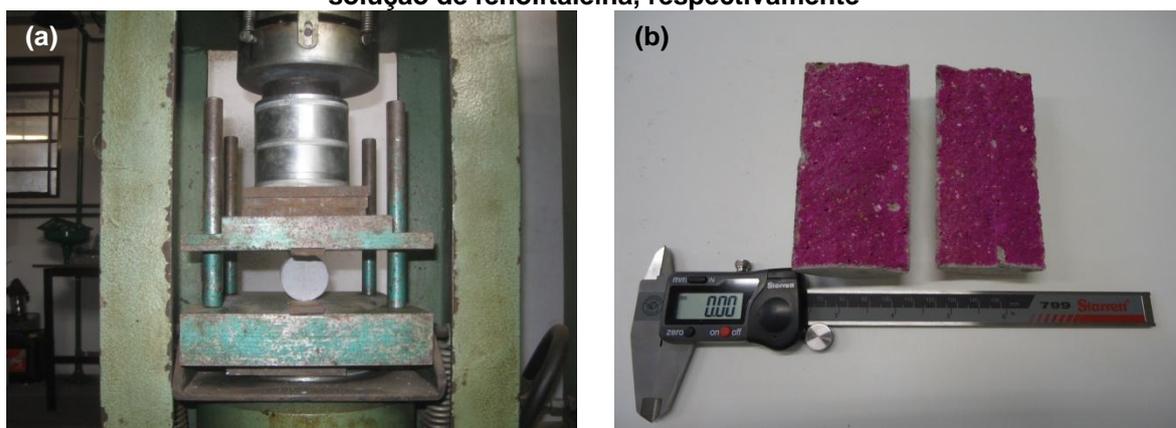
**Figura 4.17 – Corpos de prova de argamassa em período de sazonalização e condicionados ao ensaio de carbonatação, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

A verificação da profundidade de carbonatação foi realizada pelo método colorimétrico de tratamento com solução de fenolftaleína, segundo recomendação de RILEM (1984). Em primeiro estágio, os corpos de prova de argamassa foram rompidos à tração por compressão diametral, como apresentado na Figura 4.18a. Em seguida, foi aspergida solução de fenolftaleína<sup>3</sup> na superfície rompida da amostra. Pode ser observado na Figura 4.18b um corpo de prova de argamassa, antes de ser condicionado à carbonatação acelerada, que sofreu ruptura diametral, seguindo do tratamento com solução de fenolftaleína.

**Figura 4.18 – Ruptura diametral do corpo de prova e tratamento da superfície rompida com solução de fenolftaleína, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

<sup>3</sup> A solução de fenolftaleína consiste em: 1% de fenolftaleína, 29% de água destilada, 70% de álcool isopropílico (medidas em massa), segundo especificações da RILEM (1984).

O CH presente na matriz da argamassa adquire uma tonalidade rosada, enquanto a parte que sofreu carbonatação permanece inalterada. Apesar do pH de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  ser da ordem de 9,4, estudos mostraram que pH abaixo de 11,5 e 11,8 já não assegura a manutenção da passivação do aço (CASCUDO, 1997). Desta forma, a cor rosa na análise pode indicar a presença de CH, mas não a ausência total de carbonatação. A frente de carbonatação não deve ser considerada rígida, mas gradual (VILLAIN et al., 2007).

Esse tipo de análise pode ser empregado como método comparativo entre amostras, essencialmente qualitativo. Tal comparação se deu pela medição, com paquímetro digital, da profundidade incolor verificada nas bordas da superfície tratada. Cada superfície recebeu seis leituras, totalizando 12 medidas para cada corpo de prova (24 medidas para cada traço, em cada idade analisada).

#### **4.2.8 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM ARGAMASSAS**

A penetração de cloreto no concreto é um fenômeno que agrava a corrosão do aço constituinte do concreto armado. Diversas são as consequências da presença de cloreto na interface aço-concreto e, por exemplo, pode ocorrer quebra de passivação com indução da formação de pites.

A frente de penetração de cloretos foi determinada pelo método colorimétrico de aspersão de solução de nitrato de prata. O procedimento utilizado foi baseado na AASHTO T259 (1980) e nos estudos desenvolvidos por Sarmiento e Vanderlei (2011).

A escolha de corpos de prova de argamassa se deu pela facilidade de leitura da frente de penetração de cloretos, já que a pedra britada no concreto poderia agir como uma barreira à entrada dos íons na matriz de argamassa. Entretanto, a análise com corpos de prova de concretos também foi verificada, utilizando outro procedimento, conforme descrito no item 4.2.14.

Após os 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos de prova de argamassa foram levados para secagem em estufa a  $50 \pm 5$  °C até ficarem completamente secos. Em seguida, as amostras foram totalmente submersas em solução salina com concentração de 3,5% de NaCl, em massa (Figura 4.19). Essa concentração foi definida a fim de simular a agressividade de um ambiente marinho no tocante ao teor de cloreto de sódio (NaCl). A submersão total dos corpos de prova foi adotada para evitar a ação da carbonatação na argamassa e uma possível influência na análise após a aspersão da solução de nitrato de prata (já que este também pode reagir com o produto formado na reação da carbonatação,  $\text{CaCO}_3$ ).

**Figura 4.19 – Secagem e imersão em solução salina de NaCl dos corpos de prova de argamassa, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

A AASHTO T259 (1980) sugere que o corpo de prova fique em contato com a solução salina por 90 dias. No entanto, o ensaio se deu com a imersão das amostras em idades de 30, 60 e 90 dias, a fim de se tentar verificar uma possível evolução dos íons cloretos na argamassa. Para cada idade e para cada traço (AR, A30 e A50), foram destinados dois corpos de prova, totalizando 18 amostras para o ensaio.

Em um primeiro momento, a verificação da frente de penetração de cloretos consistiu em borrifar apenas solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) na superfície rompida do corpo de prova (ruptura diametral). Após a retirada da amostra da solução salina de NaCl, o corpo de prova, ainda saturado, era rompido e, em seguida, tratado com o método colorimétrico. Entretanto, este procedimento se mostrou ineficiente pela falta de nitidez na formação da frente de penetração de cloretos. O que se observava era uma dispersão, e não uma frente propriamente dita (Figura 4.20).

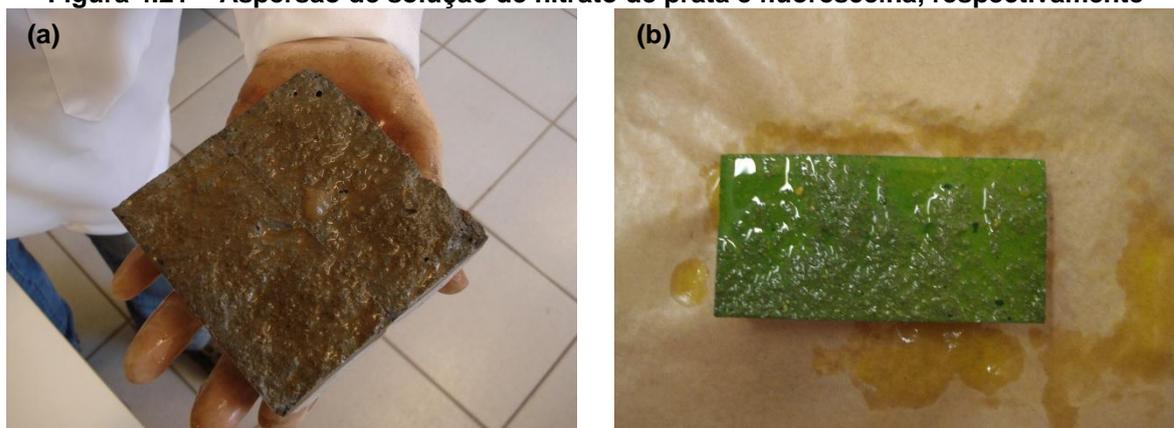
**Figura 4.20 – Tratamento com solução de  $\text{AgNO}_3$  das amostras saturadas em solução de NaCl – difícil visualização da frente de penetração de cloretos**



(Fonte: próprio autor)

Na tentativa de aprimorar a metodologia de análise, após o período de imersão em cada idade, os corpos de prova foram secos por três dias em estufa a  $105 \pm 5$  °C, e rompidos diametralmente, seguindo o mesmo procedimento utilizado na ruptura para o ensaio de carbonatação acelerada, item 4.2.6. Depois disso, borrifou-se solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ), concentração  $0,1\text{M}^4$ , na superfície rompida, seguida por aspersão de solução alcóolica de fluoresceína<sup>5</sup>, como visualizado na Figura 4.21.

**Figura 4.21 – Aspersão de solução de nitrato de prata e fluoresceína, respectivamente**



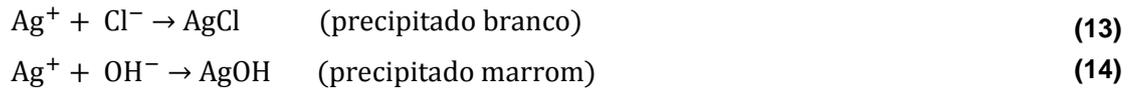
(Fonte: próprio autor)

A concentração da solução de nitrato de prata foi recomendada nos estudos desenvolvidos por Kim e outros (2007) para facilitar a observância da reação, assim como o uso posterior de solução de fluoresceína sugerido por Bertolini (2010). A quantidade de solução de  $\text{AgNO}_3$  borrifada precisou ser mínima (apenas uma leve aspergida) para que se pudesse verificar a frente de penetração de cloretos. Caso contrário, em excesso, ocorre a decomposição do  $\text{AgNO}_3$  em presença de luz, escurecendo toda a amostra, inclusive a região delimitada pela penetração dos cloretos.

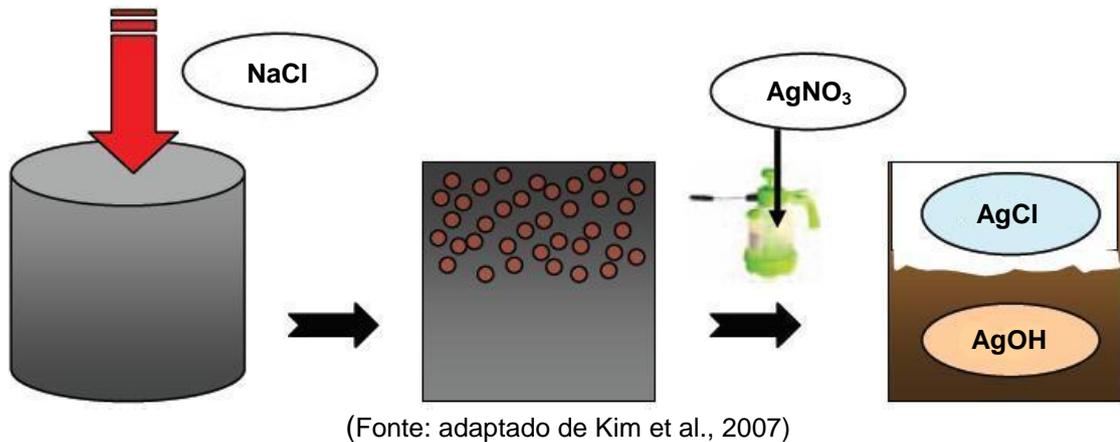
O  $\text{AgNO}_3$  reage com os cloretos livres ( $\text{Cl}^-$ ) presente na argamassa, formando um precipitado branco de cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ). Além disso, os íons  $\text{Ag}^+$  da solução aspergida também podem reagir com os íons hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ) – presentes no  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  resultante das reações de hidratação do cimento – formando um precipitado marrom de  $\text{AgOH}$ . Estas reações são apresentadas nas Equações 11 e 12, e no esquema da Figura 4.22. O uso da fluoresceína é apenas para realçar a formação do precipitado branco, não participando, efetivamente, da reação química de dupla troca com a formação do  $\text{AgCl}$ .

<sup>4</sup> Solução de  $\text{AgNO}_3$  (massa molar 169,87 g/mol), com concentração 0,1 mol/L.

<sup>5</sup> A solução alcóolica de fluoresceína consiste em: 1% de sal de fluoresceína, 29% de água destilada, 70% de álcool etílico (medidas em massa), segundo especificações de Calçada (2004).

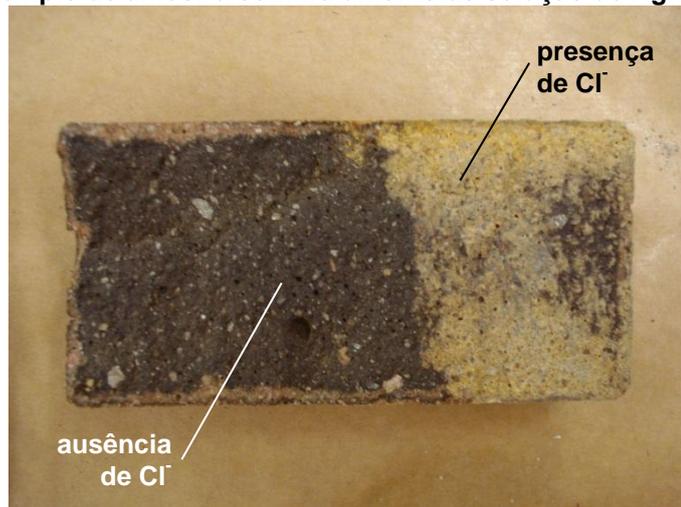


**Figura 4.22 – Representação esquemática do método colorimétrico**



Na prática, o uso da fluoresceína ajuda a intensificar as tonalidades. Deste modo, a região com ausência de cloretos livres adquire uma coloração escura. Por outro lado, na presença de cloretos, a região da amostra apresenta uma tonalidade clara ou esbranquiçada (CALÇADA, 2004). Essa diferenciação de cor pode ser verificada na Figura 4.23, indicando claramente as regiões com e sem presença de íons cloretos.

**Figura 4.23 – Exemplo de amostra com tratamento de solução de  $\text{AgNO}_3$  e fluoresceína**



(Fonte: próprio autor)

Com auxílio de um paquímetro digital, foi determinada a frente compreendida pela região mais clara da amostra, tomando como um indicativo da profundidade de penetração

de cloretos. Essas medidas eram verificadas sempre após a secagem natural da solução na superfície tratada, sendo adotado um período de 24 horas.

#### 4.2.9 CONDUCTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO AQUOSA DOS POROS

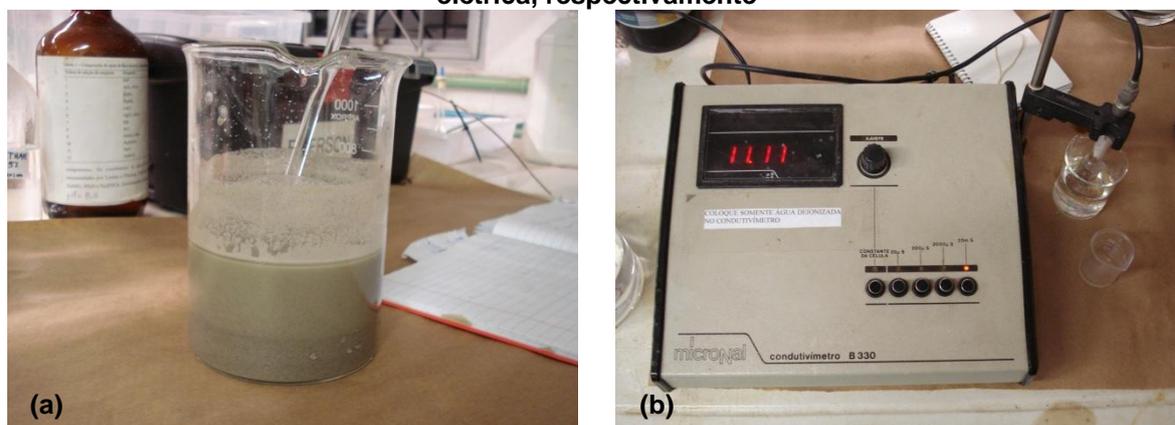
A condutividade elétrica do concreto está diretamente relacionada à mobilidade dos íons em seu interior. Quanto maior a mobilidade desses íons, maior será a condutividade elétrica na solução dos poros, facilitando a formação do processo de corrosão das armaduras (CEZAR, 2011).

A medida de condutividade elétrica depende das características da estrutura dos poros e da solução química dos poros do concreto, ligados a vários fatores como: a composição do cimento, substituição do cimento por materiais cimentícios suplementares, agregados, proporções da mistura do concreto, aditivos químicos etc (SHI, 2004).

A condutividade elétrica foi verificada para a solução aquosa dos poros de argamassa, buscando verificar a influência da ACBC nesta propriedade da matriz de argamassa do concreto. O ensaio foi realizado no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica Cerâmica (LIEC-UFSCar).

A metodologia adotada para coleta das amostras foi com base nos trabalhos de Rosa (2005) e Cezar (2011). Os corpos de prova de argamassa, após cura úmida de 28 dias e secagem em estufa, foram britados manualmente e, em seguida, moídos em moinho tipo pistilo-almofariz, a uma rotação de 65 rpm, por três minutos. Separou-se a mesma massa para todas as argamassas moídas. Esse material moído foi misturado em água destilada e deionizada (milli-Q) na proporção 1:1 (em massa), e a solução foi deixada em repouso por 24 horas, agitando-a em períodos determinados (Figura 4.24a).

**Figura 4.24 – Preparação da solução aquosa da argamassa e medição da condutividade elétrica, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

A água milli-Q foi utilizada por apresentar baixíssima condutividade elétrica, evitando assim, uma possível interferência nas análises. Em seguida, a solução foi filtrada a vácuo e armazenada apenas a solução passante no filtro.

A condutividade elétrica da solução aquosa dos poros, medida em S/cm (equivalente a  $(\text{ohm.cm})^{-1}$ ) foi determinada com auxílio de um condutímetro de bancada, da marca Micronal B330, e constante de célula de  $0,75 \text{ cm}^{-1}$ . O ensaio foi realizado mergulhando uma célula de vidro na solução até a estabilização da leitura (Figura 4.24b). Para cada medição, a célula de vidro foi lavada com água destilada e deionizada. O valor obtido em S (Siemens) pelo equipamento foi multiplicado pela constante de célula (em  $\text{cm}^{-1}$ ).

Antes da leitura das soluções aquosas das argamassas, foram registradas as medidas de condutividade da água destilada e da água milli-Q, cujos valores foram  $69,98 \mu\text{S/cm}$  e  $2,37 \mu\text{S/cm}$ , respectivamente. Com isso, é possível verificar o nível de pureza da água milli-Q em relação à água destilada, indicando uma menor condutividade elétrica.

#### 4.2.10 MOLDAGEM E CURA DOS CONCRETOS

Os concretos foram moldados a partir dos traços definidos por Bessa (2012), no Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar). Para isso, foram utilizados cimento Portland CP II E 32 e teores de 30% e 50% de ACBC em substituição ao agregado miúdo natural (em massa), além do concreto referência sem incorporação de ACBC. A Tabela 4.3 apresenta a relação de materiais (em massa) que cada traço utilizou para a produção dos concretos.

**Tabela 4.3 – Relação de materiais (em massa) utilizada para cada traço de concreto**

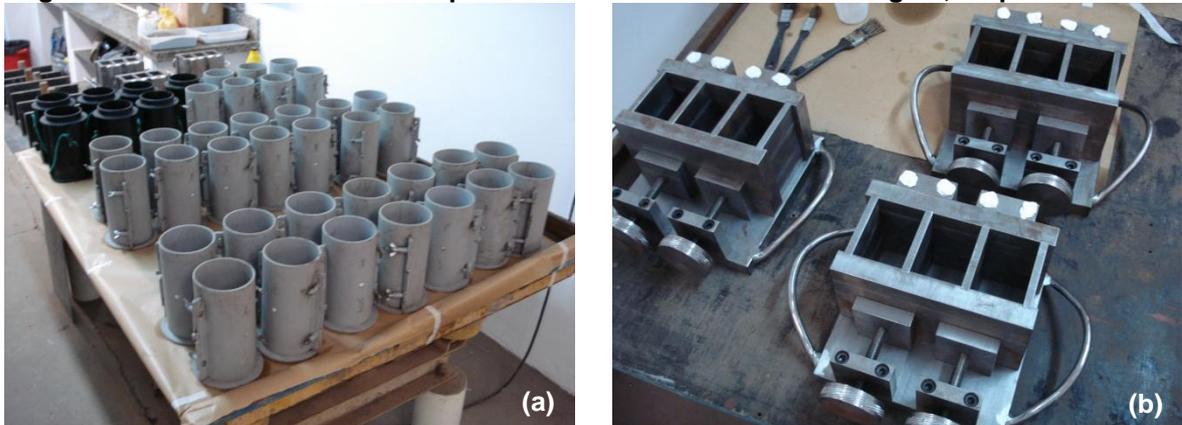
Traço	Teor de ACBC	Cimento	Areia	ACBC	Brita	Água
CR	0%	1,000	2,010	-	2,860	0,52
C30	30%	1,000	1,407	0,603	2,860	0,53
C50	50%	1,000	1,005	1,005	2,860	0,54

O consumo de cimento foi de  $425 \text{ kg/m}^3$  para todos os traços. O teor de argamassa também foi mantido constante no valor de 51,30%.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos (Figura 4.25). Os primeiros, com dimensões de 100 x 200 mm, para diâmetro e altura, respectivamente, foram utilizados para os ensaios de resistência mecânica, absorção e índice de vazios, e penetração de cloretos. Os corpos de prova prismáticos, de dimensões 50 x 70 x 100 mm

foram utilizados para o ensaio acelerado de corrosão por ação de cloretos (potencial de corrosão), cujo detalhamento das amostras foi apresentado no item 4.2.13.

**Figura 4.25 – Moldes cilíndricos e prismáticos utilizados na concretagem, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

A moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos seguiram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003).

Os materiais foram misturados em uma betoneira de 120L. Primeiramente, foram misturados os agregados (brita, areia natural e ACBC) e cerca de 80% da água por dois minutos, aproximadamente (Figura 4.26a). Em seguida, adicionou-se o cimento e o restante da água e deixou-se até a completa homogeneização da mistura (cerca de dois minutos). O transporte do concreto fresco para o local de moldagem dos corpos de prova foi realizado por meio de uma carriola (Figura 4.26b).

**Figura 4.26 – Amassamento do concreto**



(Fonte: próprio autor)

Antes da moldagem, realizou-se o teste de consistência do concreto fresco pelo abatimento de tronco de cone, segundo as especificações da NBR 7223 (ABNT, 1992). O tronco de cone, fixado por um experimentador, foi preenchido com concreto em três camadas, aplicando 25 golpes com a haste metálica em cada camada para adensamento (Figura 4.27a). O índice de consistência foi verificado pela diferença de altura do concreto fresco após a retirada do molde metálico, como verificado na Figura 4.27b.

**Figura 4.27 – Ensaio de abatimento do tronco de cone**



(Fonte: próprio autor)

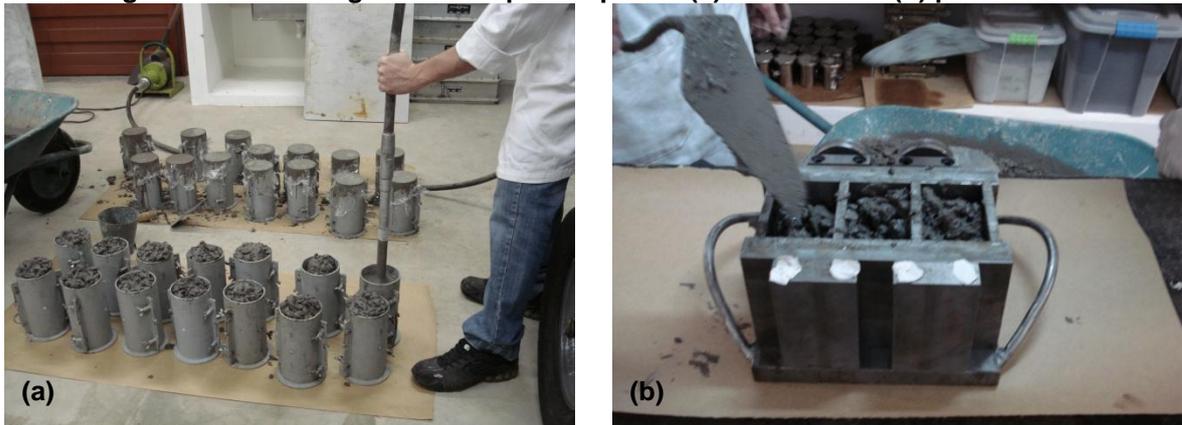
Os valores obtidos no ensaio de abatimento do tronco de cone foram apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Índice de consistência dos concretos**

<b>Traço</b>	<b>Teor de ACBC</b>	<b>Consistência (mm)</b>
CR	0%	90 ± 10
C30	30%	87 ± 10
C50	50%	55 ± 10

Após a verificação da consistência, os corpos de prova foram moldados. Os moldes foram untados com óleo para facilitar a desforma. Em seguida, foram preenchidos com concreto e adensados. Os corpos de prova cilíndricos foram adensados com vibrador mecânico tipo agulha (Figura 4.28a). Os moldes prismáticos foram preenchidos em duas camadas de concreto, sendo que cada camada foi vibrada com auxílio de uma mesa vibratória (Figura 4.28b). Após o preenchimento, os corpos de prova de concreto foram cobertos com plástico filme para evitar a perda de água para o ambiente, dosada para as reações de hidratação do cimento.

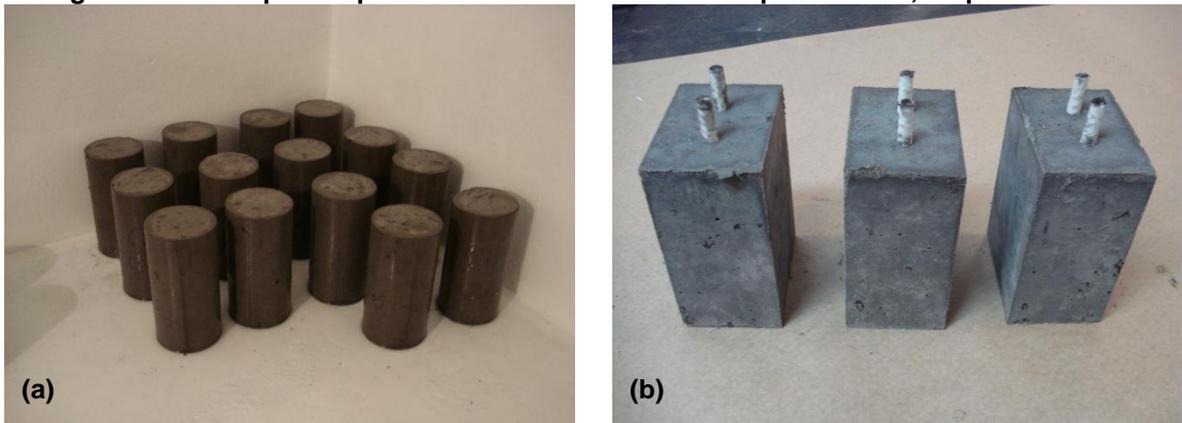
**Figura 4.28 – Moldagem dos corpos de prova: (a) cilíndricos e (b) prismáticos**



(Fonte: próprio autor)

A desforma dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos ocorreu depois de 24 horas após a concretagem (Figura 4.29).

**Figura 4.29 – Corpos de prova de concreto cilíndricos e prismáticos, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

Os corpos de prova cilíndricos foram levados para cura em câmara úmida, com umidade relativa de  $95\% \pm 5\%$ , onde ficaram por 28 dias. Já os corpos de provas prismáticos, antes de serem levados para a cura, foram preparados para o ensaio de potencial de corrosão, conforme procedimento descrito no item 4.2.13.

#### **4.2.11 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS**

Após os 28 dias de cura, os corpos de prova de concretos foram analisados mecanicamente por meio dos ensaios: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.

Para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, os corpos de prova de concreto foram capeados com pasta de cimento a fim de regularizar as superfícies que ficariam em contato com a prensa, para uma melhor distribuição da carga. Esses dois ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil, do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, da Universidade de São Paulo (LCC-IAUSC-USP).

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado com base nas especificações da NBR 5739 (ABNT, 1994). Foram ensaiados quatro corpos de prova de cada traço de concreto (CR, C30 e C50), em prensa servo-mecânica, a uma velocidade constante (Figura 4.30). A resistência à compressão foi calculada pela relação entre a carga máxima de ruptura e a área da seção transversal da amostra, em MPa.

**Figura 4.30 – Ensaio de resistência à compressão axial do concreto**



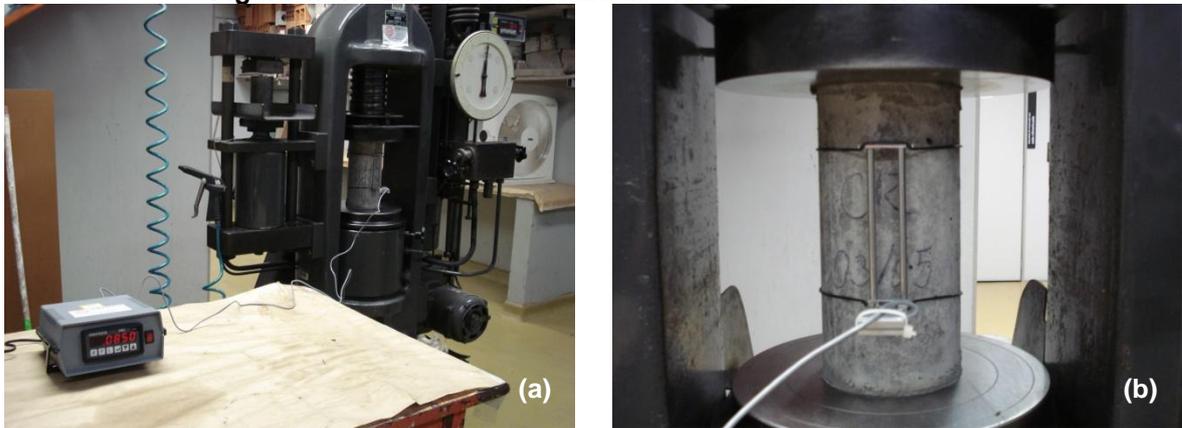
(Fonte: próprio autor)

Além da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias, o ensaio de compressão axial também foi realizado para os concretos submetidos ao ataque de cloretos ao final do ensaio acelerado de potencial de corrosão (item 4.2.13). Três amostras de cada traço tiveram o mesmo tratamento que os corpos de prova prismáticos destinados para aquele ensaio, sendo que, com o fim do mesmo, os corpos de prova cilíndricos foram rompidos à compressão axial. O tratamento consistiu em submeter os corpos de prova cilíndricos a ciclos de secagem (cinco dias em estufa a  $50 \pm 5$  °C) e umedecimento (dois dias de imersão total em solução salina de 3,5% de NaCl). O ensaio foi encerrado após 24 semanas de tratamento, totalizando 168 dias de idade do concreto.

O módulo de elasticidade dos concretos foi determinado com base no ensaio definido pela NBR 8522 (ABNT, 2008). Adotou-se a Metodologia A definida pela norma, com a tensão  $\sigma_A$  fixa em 0,5 MPa, e a tensão  $\sigma_B$  correspondente à 30% da tensão de ruptura obtida

através do ensaio de resistência à compressão. O ensaio foi realizado na mesma prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão, com a diferença de que nesse foram posicionados extensômetros para a leitura da deformação do concreto (Figura 4.31).

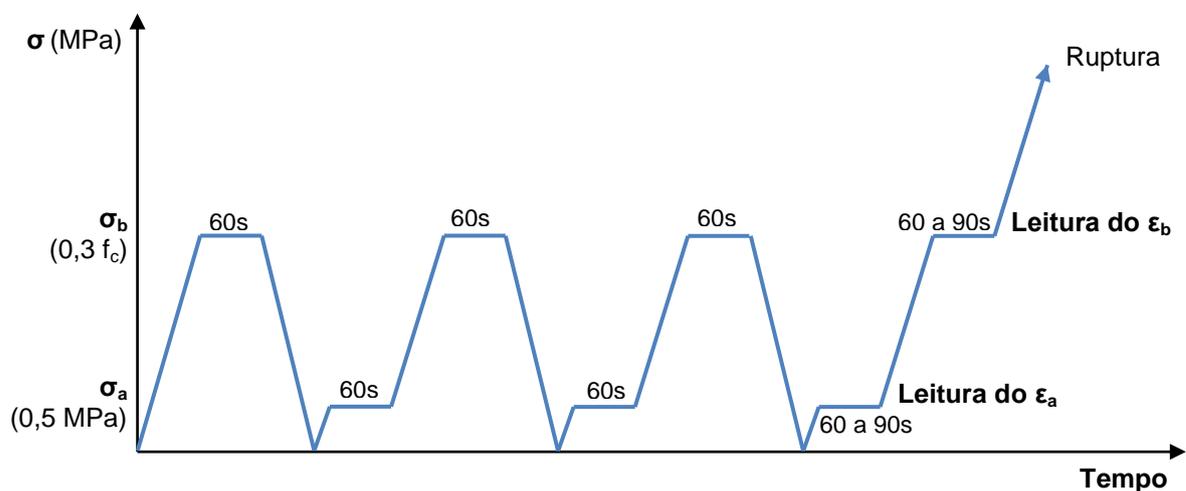
**Figura 4.31 – Ensaio de módulo de elasticidade do concreto**



(Fonte: próprio autor)

Inicialmente, o corpo de prova foi carregado até a tensão limite superior ( $\sigma_B$ ) e mantido por 60 segundos. Em seguida, descarregado. Novamente, carregou-se o corpo de prova até a tensão de 0,5 MPa e mantido por 60 segundos. Após este intervalo, o carregamento foi continuado até a tensão limite superior ( $\sigma_B$ ) e mantido por 60 segundos. O processo foi repetido por mais duas vezes, sendo que, no último procedimento, os valores das deformações foram verificados para as tensões limites inferior ( $\sigma_A$ ) e superior ( $\sigma_B$ ), respectivamente,  $\epsilon_a$  e  $\epsilon_b$ . Foi apresentada na Figura 4.32 uma representação esquemática do procedimento do ensaio para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, utilizando a Metodologia A.

**Figura 4.32 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A**



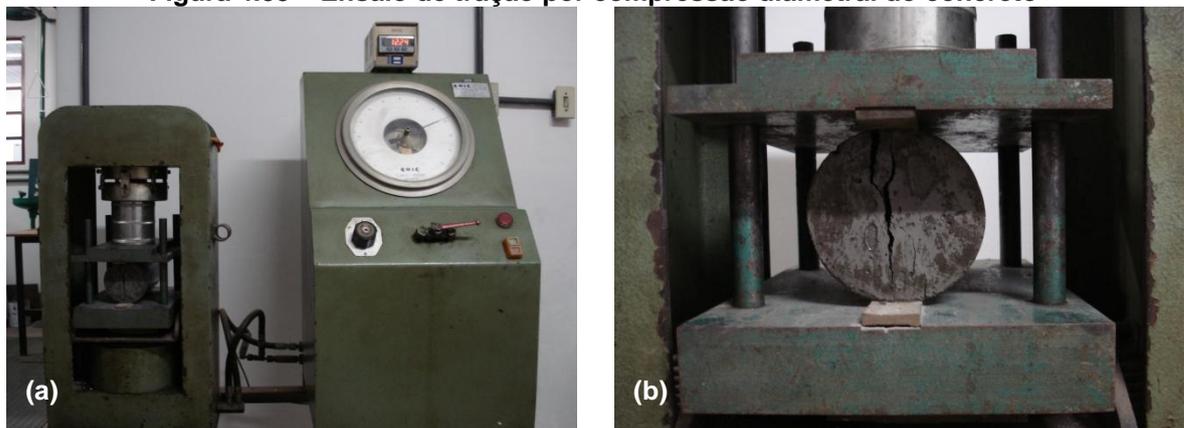
(Fonte: adaptado de NBR 8522, 2008)

O valor do módulo de elasticidade, em GPa, foi obtido pela Equação 15.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_B - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} * 10^{-3} \quad (15)$$

Outra verificação mecânica do concreto foi a sua resistência à tração por compressão diametral, definida pela NBR 7222 (ABNT, 1994). Centralizou-se a geratriz do corpo de prova de concreto sobre o prato da prensa hidráulica, da marca EMIC com capacidade de 100 toneladas, do Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar). Aplicou-se sobre ele, uma carga de compressão constante, conforme verificado na Figura 4.33.

**Figura 4.33 – Ensaio de tração por compressão diametral do concreto**



(Fonte: próprio autor)

O valor da resistência à tração do concreto, em MPa, foi determinado pela Equação 16, onde  $F$  foi a carga máxima de ruptura (em kN),  $d$  o diâmetro do corpo de prova (em mm), e  $L$  altura do corpo de prova (em mm).

$$f_{t,D} = \frac{2 * F}{\pi * d * L} \quad (16)$$

#### 4.2.12 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS

As propriedades físicas verificadas para o concreto foram a massa específica, o índice de vazios e a absorção de água, determinados segundo as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 1987). O procedimento utilizado foi o mesmo descrito para as argamassas, no item 4.2.5, utilizando três corpos de prova para o ensaio. Em resumo, secou-se as amostras em estufa a  $105 \pm 5$  °C, por 72 horas (Figura 4.34a). Imergiram-nas em água em três fases:

nas primeiras 4 horas, 1/3 do volume foi submerso (Figura 4.34b); nas 4 horas seguintes, adicionou-se água até 2/3 do volume do corpo de prova; e nas 64 horas restantes, as amostras foram totalmente submersas. Cada propriedade – massa específica, índice de vazios e absorção de água – foi calculada pelas relações entre as três medidas obtidas no ensaio: massa seca, massa saturada com superfície seca e a massa saturada imersa (Figura 4.34c).

**Figura 4.34 – Ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica do concreto**



(Fonte: próprio autor)

A avaliação dos resultados de absorção dos concretos foi feita com base nos critérios definidos pelo CEB 192 (1989) apresentados por Cascudo (1997). De acordo com as especificações, os limites de absorção do concreto foram definidos em 3% e 5%, sendo que, os valores abaixo de 3% o concreto é considerado com baixa absorção, acima de 5%, alta absorção, e entre esses dois intervalos, é considerado com absorção média.

#### **4.2.13 AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DOS CONCRETOS POR MEIO DE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS**

A avaliação da corrosão das armaduras nos concretos foi realizada por meio das técnicas eletroquímicas de potencial de corrosão e de curvas de polarização.

A primeira buscou verificar, qualitativamente, a probabilidade de despassivação da armadura em cada um dos concretos analisados, cujo período de ensaio foi de 18 semanas. A segunda foi realizada somente após o término do ensaio de potencial de corrosão, realizado na 22ª semana, buscando avaliar, de forma quantitativa, a velocidade de corrosão das barras de aço nas amostras submetidas à primeira análise. Desta forma, todo o desenvolvimento experimental deste tópico visou à avaliação através do potencial de corrosão, sendo que as curvas de polarização foram utilizadas para complementação da análise.

A avaliação do potencial de corrosão foi feita a partir de ensaios acelerados de corrosão por ação de cloretos utilizando técnicas eletroquímicas. Essa análise foi utilizada como um indicativo da condição de passivação das barras de aço. Para tanto, foram definidos alguns procedimentos experimentais, baseados em trabalhos e normas desta natureza (CABRAL, 2000; JOUKOSKI, 2003; SANTOS, 2006; SILVA, 2006; TORRES, 2006 ASTM C876-91, 2009; RIBEIRO, 2010; SILVA, 2010), tais como: limpeza e preparação das barras de aço; moldagem e preparação dos corpos de prova; ciclos de envelhecimento acelerado; confecção do eletrodo de referência; medições dos potenciais de corrosão; e taxa de corrosão das armaduras.

No caso específico dos ensaios de potencial de corrosão, foi utilizada uma repetição de três corpos de prova por teor de substituição de ACBC (CR, C30 e C50). Este número foi balizado em experimentos já realizados por outros pesquisadores no âmbito do estudo do potencial de corrosão em armaduras (JOUKOSKI, 2003).

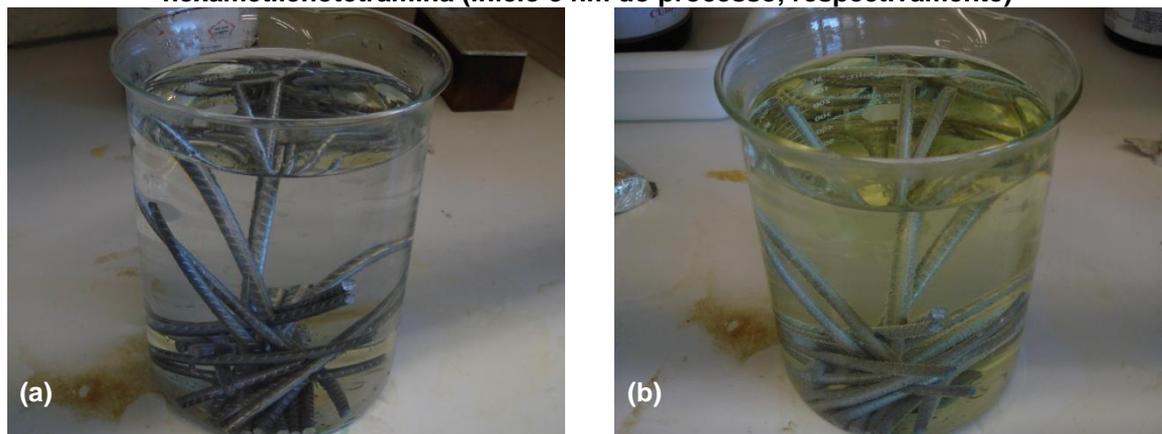
#### **a) Limpeza e preparação das barras de aço**

As amostras de aço CA-60 foram submetidas a uma limpeza para remoção dos óxidos originalmente presentes nas barras, com base no procedimento definido pela ASTM G1-03 (2011). Este procedimento, também utilizado por Cabral (2000) e Ribeiro (2010), buscou uma padronização da condição superficial inicial das barras utilizadas no ensaio. Essa limpeza foi realizada no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica Cerâmica (LIEC-UFSCar).

Inicialmente, as barras de aço foram imersas em solução de ácido clorídrico 1:1, com 3,5 g/L de hexametenotetramina, por 10 minutos. Esse tempo foi ideal para que os óxidos fossem removidos, sem atacar o metal. Ainda assim, o hexametenotetramina adicionado à solução atuou como um inibidor de corrosão, devido a uma possível agressão causada pela limpeza das barras com solução ácida.

O processo de limpeza das barras pode ser observado na Figura 4.35, com a diferenciação de cor da solução de ácido clorídrico com hexametenotetramina no início (a) e no final da imersão (b), respectivamente. A coloração amarelada ao final da limpeza indicou o turvamento da solução pela remoção dos óxidos presentes nas barras de aço (formação de cloretos de ferro).

**Figura 4.35 – Limpeza das barras de aço com solução de ácido clorídrico e hexametenotetramina (início e fim do processo, respectivamente)**

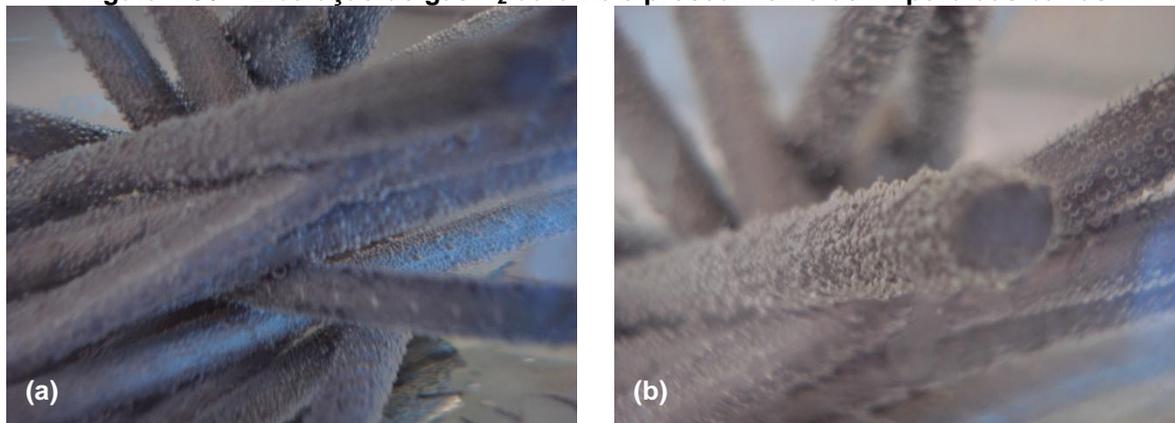


(Fonte: próprio autor)

Ainda neste processo, foi possível verificar a redução do hidrônio com a liberação do gás hidrogênio ( $H_2$ ) na forma de bolhas de ar ao longo da superfície das barras de aço, indicando a reação de oxirredução da barra com o ácido clorídrico (HCl). Essa reação foi apresentada nas Equações 17 e 18, e observada na Figura 4.36.



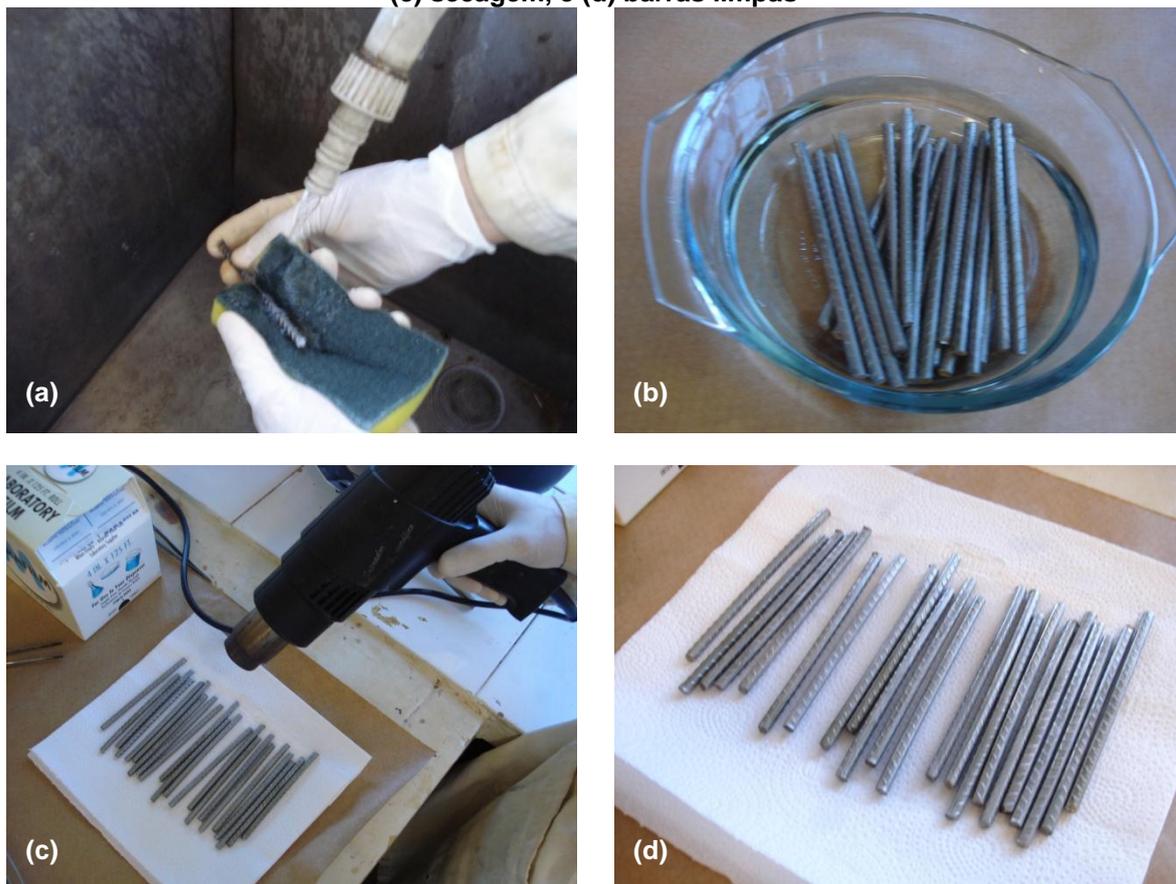
**Figura 4.36 – Liberação do gás  $H_2$  durante o procedimento de limpeza das barras**



(Fonte: próprio autor)

Após a imersão em solução ácida, as barras de aço foram lavadas em água destilada corrente, e esfregadas com bucha, a fim de remover os óxidos remanescentes (Figura 4.37a). Em seguida, as barras foram imersas em acetona por 2 minutos, para retirada dos elementos gordurosos e facilitar a evaporação de água (Figura 4.37b). A secagem das barras foi realizada com um jato de ar quente (Figura 4.37c).

**Figura 4.37 – Continuação do processo de limpeza: (a) escovação, (b) imersão em acetona, (c) secagem, e (d) barras limpas**

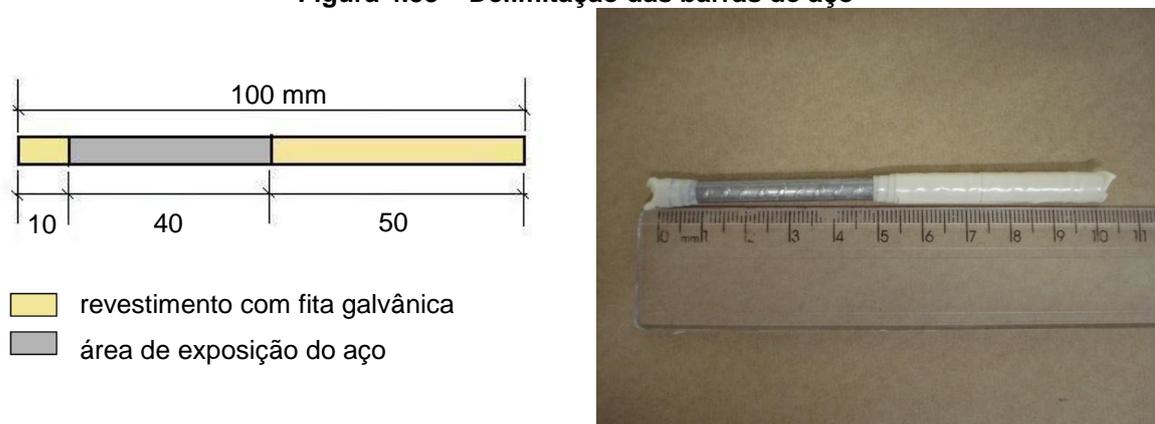


(Fonte: próprio autor)

Com o procedimento de limpeza concluído, as barras foram pesadas e, em seguida, encapsadas. A pesagem das barras se deu em balança analítica com precisão de 0,01 g, da marca Marconi. Considerando que todas as barras utilizadas tinham as mesmas características, obtidas pela mesma procedência de lote, com iguais dimensões (5 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento), a massa das amostras foi determinada pela média das barras utilizadas na moldagem dos corpos de prova, depois de limpas. O revestimento da barra se deu com fita isolante galvânica a fim de delimitar a área exposta ao ataque do agente agressivo, a qual foi posicionada no centro do corpo de prova de concreto. A

representação esquemática e a foto da barra de aço revestida com fita galvânica podem ser observadas na Figura 4.38.

**Figura 4.38 – Delimitação das barras de aço**



(Fonte: próprio autor)

Posteriormente, após a moldagem dos corpos de prova, as barras foram conectadas a fios de cobre flexíveis, sendo que, para isso, parte do revestimento que não ficou imerso no concreto foi retirada.

#### **b) Moldagem e preparação dos corpos de prova**

Os corpos de prova foram dimensionados, moldados e preparados com base nos procedimentos utilizados por Ribeiro (2010).

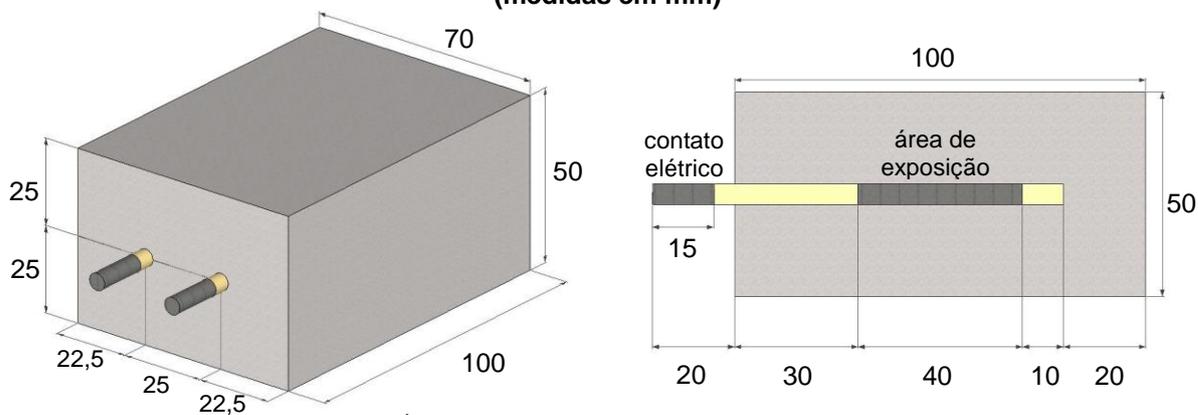
Inicialmente, realizou-se um estudo para determinação das dimensões do corpo de prova. Este estudo foi embasado na NBR 6118 (ABNT, 2007), para que as amostras prismáticas de concreto pudessem atender às especificações mínimas de cobertura e espaçamento entre as barras. Mesmo simulando um ambiente altamente agressivo para a realização do ensaio acelerado, considerou-se o menor cobertura aceitável pela normalização (2 cm). A partir disso, adotou-se o diâmetro da barra de aço de 5 mm.

As barras de aço foram posicionadas de modo que a parte vulnerável ao processo corrosivo (área exposta não revestida pela fita isolante galvânica) pudesse estar na região central do corpo de prova.

A representação esquemática do corpo de prova de concreto pode ser verificada na Figura 4.39, bem como o posicionamento das barras de aço no interior do mesmo. Nesta ilustração, podem-se perceber duas partes não revestidas com a fita galvânica: a área de exposição, interna ao corpo de prova, induzida para o início do processo corrosivo; e a parte

externa ao concreto, na qual foi retirada a fita isolante, posteriormente à moldagem, para o contato elétrico.

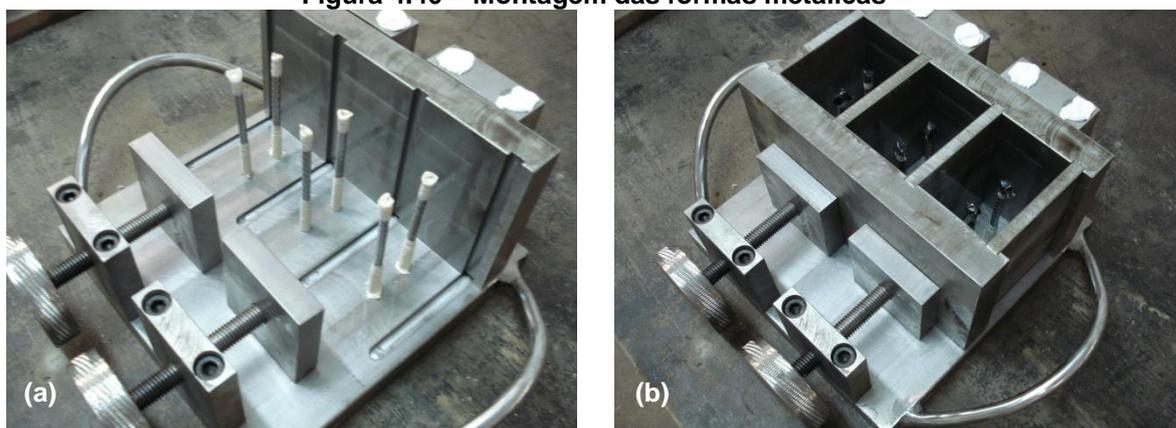
**Figura 4.39 – Representação esquemática do corpo de prova de concreto armado (medidas em mm)**



(Fonte: adaptado de Santos, 2006)

Com as dimensões e os posicionamentos dos elementos definidos, os corpos de prova prismáticos de concreto foram moldados em formas metálicas usinadas para o ensaio. A Figura 4.40 apresenta a montagem dos moldes metálicos, com as barras de aço já posicionadas.

**Figura 4.40 – Montagem das formas metálicas**



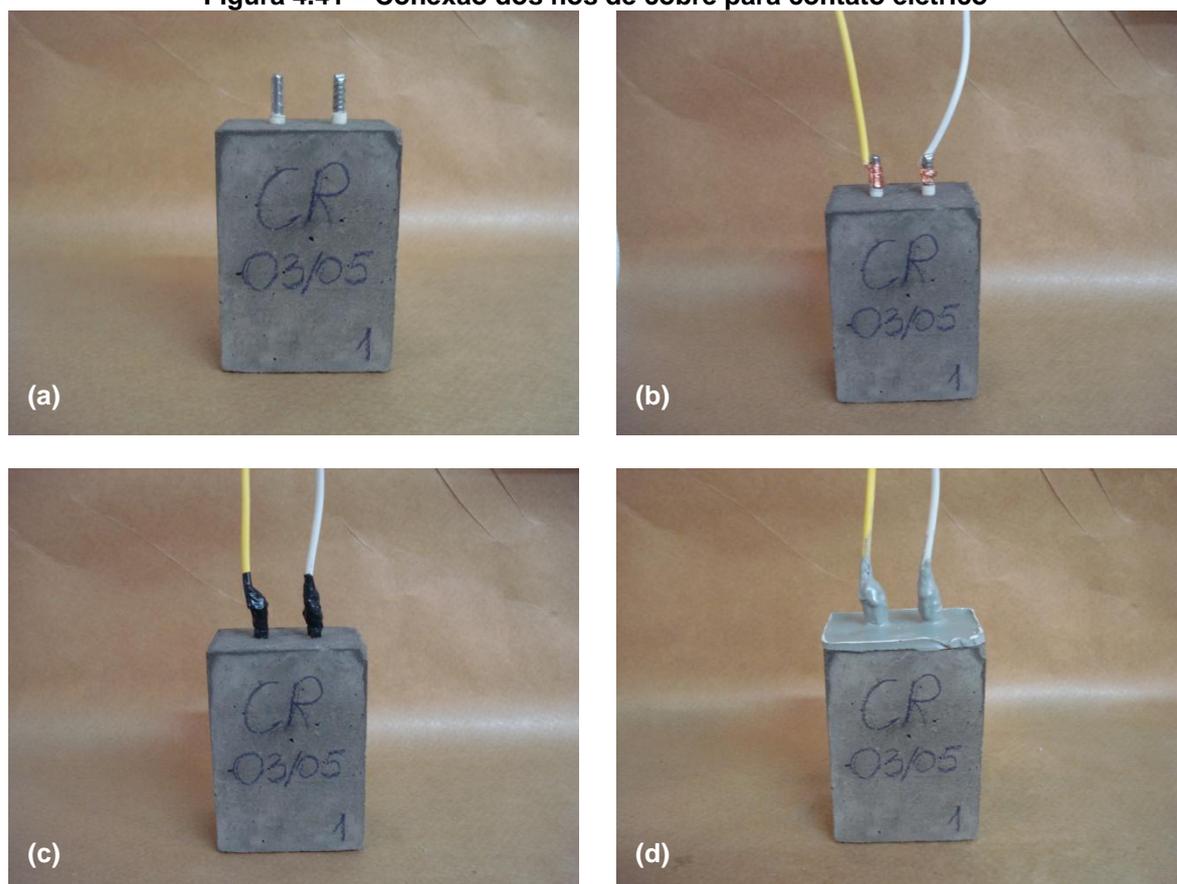
(Fonte: próprio autor)

Os moldes foram construídos com base nas dimensões adotadas. O fundo da forma foi feito com uma chapa de aço de 20 mm, com furos no local onde seriam posicionadas as barras de aço. Essa espessura de chapa foi ideal para que as barras pudessem ficar 20 mm salientes ao corpo de prova de concreto, após a desforma, de modo a permitir a ligação

posterior das barras aos fios de cobre flexíveis. O procedimento de moldagem foi descrito no item 4.2.10.

Após 24 horas da concretagem, os corpos de prova foram desmoldados e conectados fios de cobre flexíveis de 2,5 mm de diâmetro para contato elétrico nas medidas eletroquímicas. Para isso, foi retirado cerca de 15 mm da fita isolante galvânica que encobria as barras de aço salientes ao concreto, e limpas com esponja de aço para remoção da cola (Figura 4.41a,b). A diferenciação de cores dos fios flexíveis foi necessária para facilitar a identificação posterior da barra que atuaria como eletrodo de trabalho e daquela que seria o contraeletrodo. Em seguida, uma fita isolante foi passada para garantir a ligação entre a barra e o fio, além de isolar a região desencapada (Figura 4.41c). Esse procedimento ainda foi reforçado com o revestimento de uma resina epóxi sobre a superfície do corpo de prova (Figura 4.41d).

**Figura 4.41 – Conexão dos fios de cobre para contato elétrico**



(Fonte: próprio autor)

Após a secagem da resina (cerca de 1 hora), os corpos de prova foram levados para a cura em câmara úmida, por 28 dias.

### c) Ciclos de envelhecimento acelerado

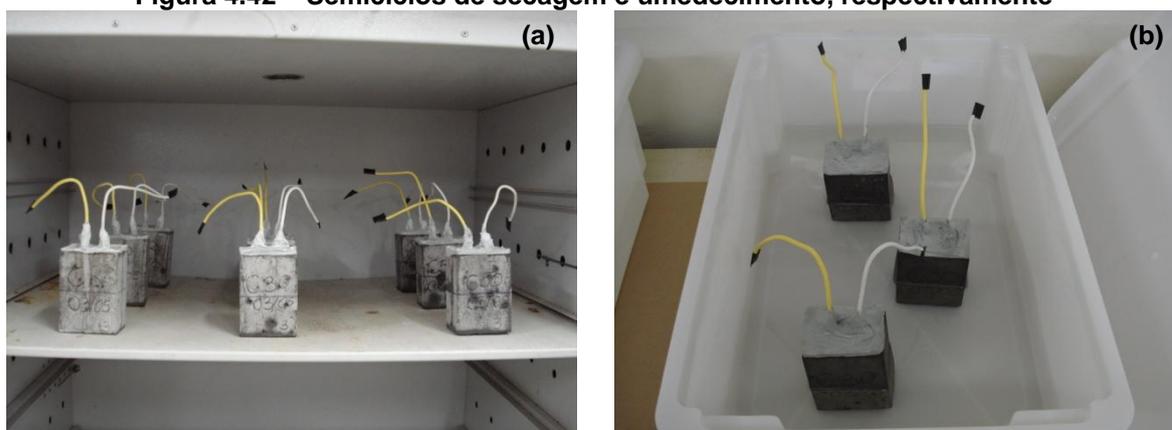
Os corpos de prova de concreto foram submetidos a ciclos de envelhecimento acelerado através de ataque por cloretos, conforme metodologia utilizada por Cabral (2000) e Ribeiro (2010).

A aceleração consiste em semiciclos de imersão parcial dos concretos em solução salina, alternados com semiciclos de secagem. Esses ciclos aceleram o processo corrosivo, pois facilita a difusão do oxigênio e a penetração de cloretos nos poros de concreto. Os cloretos, inicialmente presentes na forma iônica, precipitam-se como sais nos poros do concreto, fazendo com que a sua concentração aumente a cada ciclo (SILVA, 2006).

Ribeiro (2010) ainda expôs que, ao considerarmos a imersão parcial do corpo de prova, o ingresso de cloretos ocorre inicialmente por absorção capilar – pois as amostras estão inicialmente secas – e por difusão após a saturação dos poros. Neste sentido, o processo é acelerado devido à evaporação de água através da parte não submersa do concreto, pois, em um material poroso, há uma relação entre a força de sucção capilar e o grau de saturação. Quando existe uma região exposta e seca, as forças de sucção serão maiores, o que levará a um movimento mais rápido da água no interior do concreto.

A solução agressiva utilizada foi uma solução aquosa a 3,5% de NaCl, em massa. Esta concentração foi utilizada com êxito por outros pesquisadores (FRANCY & FRANÇOIS, 1998; ASRAR et al., 1999; GU et al., 1999; JENSEN, et al., 1999; SWAMY et al., 1999; CABRAL, 2000; GU et al., 2000; JOUKOSKI, 2003; SILVA, 2006) em estudos sobre corrosão em armaduras em concreto, sendo que a concentração de NaCl na água do mar varia de 2,5 a 3,5%. A cada quatro ciclos a solução salina foi trocada por outra de igual concentração.

Após os 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos de prova que estavam saturados de água foram secos em estufa a  $50 \pm 5$  °C. Esse foi o estágio inicial das medições de potencial de corrosão. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de secagem e umedecimento. O tempo de cada semiciclo foi definido com base nos experimentos bem sucedidos de Cabral (2000) e Ribeiro (2010), adotando cinco dias de secagem em estufa a  $50 \pm 5$  °C com ventilação de ar (para o semiciclo de secagem, Figura 4.42a), e dois dias de imersão parcial (até a metade dos corpos de prova) em solução salina de 3,5% de NaCl (para o semiciclo de umedecimento, Figura 4.42b).

**Figura 4.42 – Semiciclos de secagem e umedecimento, respectivamente**

(Fonte: próprio autor)

Ao final de cada semiciclo, foi realizada uma leitura do potencial de corrosão e verificada a massa de cada corpo de prova. A variação da massa foi considerada para a avaliação do grau de saturação dos poros dos concretos em análise.

#### **d) Confecção do eletrodo de referência**

O eletrodo de referência tem a função de propiciar um potencial estável e reprodutível para as medidas de potencial de corrosão no ensaio acelerado de corrosão por ataque de cloretos.

A ASTM C876-91 (2009) sugere o uso do eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), mas permite o uso de outros tipos, desde que tenham características, precisão, alcance e estabilidade similares ao  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ . Ela sugere o uso de calomelano saturado (usado em laboratórios) ou de prata/cloreto de prata (usado em concretos submersos em água do mar).

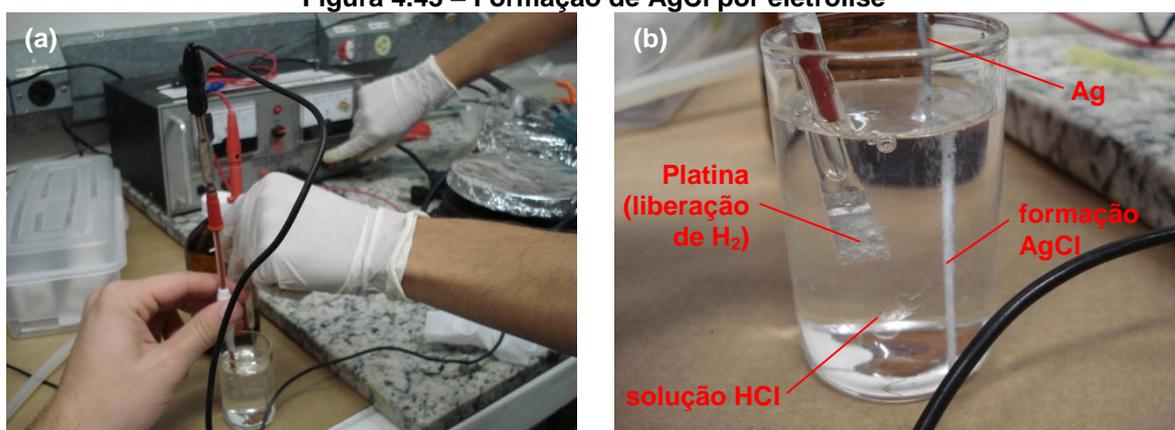
De acordo com Ponte (2003), a precisão do eletrodo de referência de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , embora adequada para a maioria das pesquisas de corrosão, é inferior à precisão do calomelano ou do eletrodo de prata/cloreto de prata. A utilização deste eletrodo é verificada, principalmente, em medidas de campo, uma vez que são menos precisas. Além disso, considerando que a solução agressiva utilizada no ensaio é de  $\text{NaCl}$  (3,5%), pode-se verificar uma possível contaminação do eletrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  com a solução salina.

Por sua vez, o eletrodo de referência de calomelano saturado possui mercúrio em sua composição, sendo definido por  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}_{\text{sat}}$ . Devido a sua maior toxicidade e a necessidade mais cautelosa de manuseio e descarte, optou-se por não utilizá-lo no trabalho, apesar de muitos pesquisadores tê-lo preferido (CABRAL, 2000; SANTOS, 2006; SILVA, 2010; RIBEIRO, 2010).

Contudo, foi adotado o uso do eletrodo de referência de prata/cloreto de prata, em solução saturada de cloreto de potássio ( $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}_{\text{sat}}$ ), confeccionado no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica Cerâmica (LIEC-UFSCar).

A construção do eletrodo de referência se deu com um fio de prata, solução de KCl saturada<sup>6</sup> e um tubo de vidro com fio de platina fundido em uma das extremidades para o contato elétrico. Inicialmente, lixou-se o fio de prata para remoção de impurezas e, em seguida, lavou-o com água destilada e deionizada. Para acelerar o processo de formação do AgCl, preparou-se uma eletrólise, induzindo a transferência de elétrons por meio de uma corrente elétrica de uma fonte externa (Figura 4.43a). Colocou-se a prata (eletrodo de trabalho) e um contraeletrodo de platina (Pt) em uma solução de ácido clorídrico (HCl), com concentração 0,1 M, e aplicou-se um potencial necessário para que se verificasse a oxidação da prata com deposição do cloreto, formando o AgCl (precipitado branco, Figura 4.43b).

**Figura 4.43 – Formação de AgCl por eletrólise**



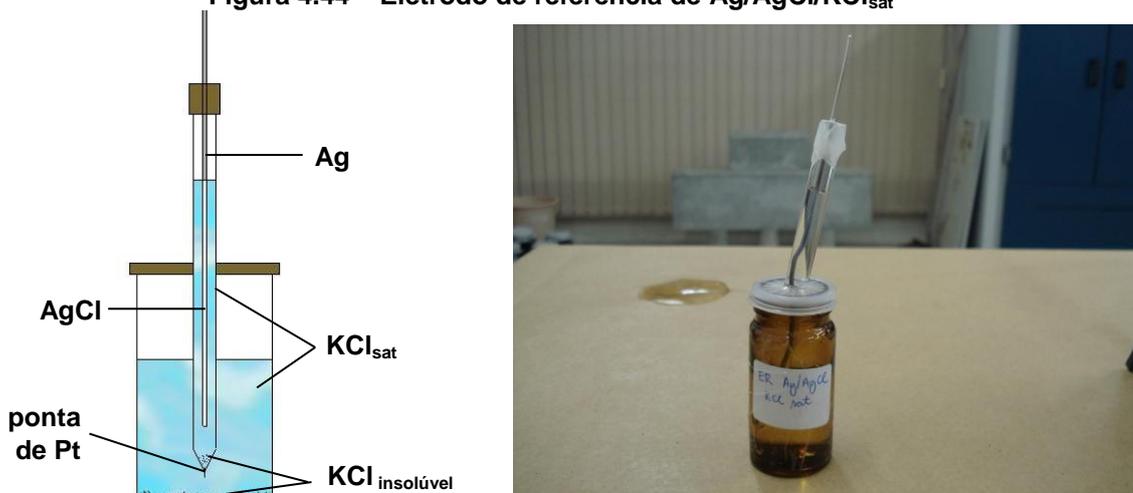
(Fonte: próprio autor)

Em seguida, o fio de prata oxidado  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  foi introduzido no tubo de vidro com solução saturada de KCl, deixando uma parte do fio de prata exposta. O tubo foi vedado e armazenado imerso parcialmente em solução saturada de KCl, com a extremidade de platina (Pt) submersa. As medições de potencial de corrosão foram feitas com o contato desta extremidade no corpo de prova de concreto, pois nela existem microfissuras que permitem a transferência de íons, atuando como uma membrana semipermeável.

A representação esquemática e a foto do eletrodo de referência de  $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}_{\text{sat}}$  confeccionado para o ensaio de potencial de corrosão podem ser verificados na Figura 4.44.

<sup>6</sup> Solubilidade do KCl em água a 25°C: 36g de KCl para 100g de solvente (água).

**Figura 4.44 – Eletrodo de referência de Ag/AgCl/KCl<sub>sat</sub>**



(Fonte: próprio autor)

O eletrodo confeccionado foi calibrado com outro eletrodo de referência de Ag/AgCl/KCl<sub>sat</sub> já utilizado (controle), por meio da conferência da diferença de potencial entre os dois eletrodos, quando imersos em uma mesma solução de KCl saturada. Essa diferença, medida com um multímetro, foi nula, indicando a confiabilidade do eletrodo confeccionado.

#### **e) Medidas do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )**

A medição da técnica de potencial de corrosão consiste em verificar a diferença de potencial de um eletrodo de trabalho (armadura) e o eletrodo de referência (Ag/AgCl/KCl<sub>sat</sub>), através de um voltímetro de alta impedância de entrada, apresentando resultados na forma de linhas equipotenciais sobre a estrutura de concreto armado (TORRES, 2006).

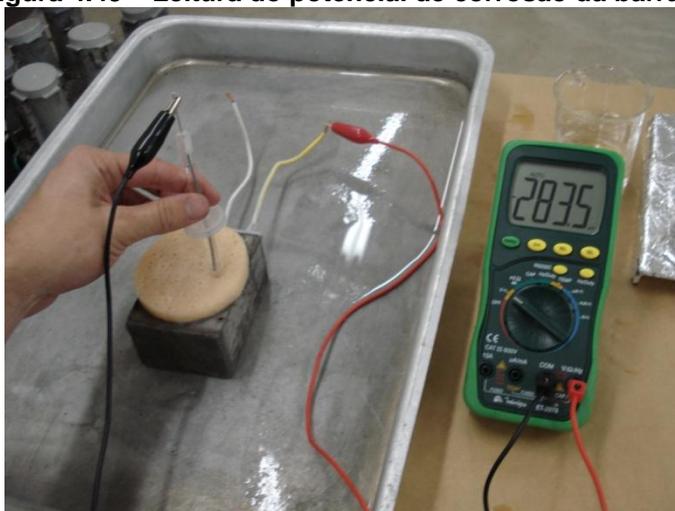
As leituras foram realizadas ao final de cada semiciclo de secagem e umedecimento, sendo iniciadas após os 28 dias de cura, conforme procedimento seguido por Cabral (2000). O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC-UFSCar).

Para as medições, utilizou-se um multímetro da marca Minipa. Sobre o corpo de prova, foi posicionado uma esponja umedecida com a solução salina de NaCl, 3,5% de concentração, para melhorar o contato elétrico entre o eletrodo de referência e o corpo de prova. Sobre o conjunto (corpo de prova + esponja) foi posicionado o eletrodo de referência de Ag/AgCl e conectado ao voltímetro pelo polo negativo (fio preto). O eletrodo de trabalho foi conectado ao equipamento pelo polo positivo (fio vermelho), sendo que a cada medição, foram registradas duas leituras: uma para a barra A (fio amarelo), e outra para a barra B (fio branco).

A cada leitura, o eletrodo de referência foi colocado sempre na mesma posição, sobre o meio da barra em análise, aproximadamente no centro da área de exposição da barra. A tensão líquida do voltímetro representou o potencial da barra de aço, medido com relação ao eletrodo de referência utilizado.

A Figura 4.45 ilustra a célula eletroquímica para as medidas de potencial de corrosão, formada pelo eletrodo de trabalho (barra de aço) e o eletrodo de referência (Ag/AgCl/KCl<sub>sat</sub>).

**Figura 4.45 – Leitura do potencial de corrosão da barra A**



(Fonte: próprio autor)

A ASTM C876-91 (2009) define o critério de avaliação dos resultados relativo ao potencial de corrosão, com base no eletrodo de referência de Cu/CuSO<sub>4</sub>. Sendo assim, para a utilização de outro eletrodo de referência (ER) foi necessário realizar a conversão de valores, os quais foram apresentados na Tabela 4.5. Para esta conversão, considerou-se o potencial padrão E<sub>o</sub> do Ag/AgCl como +222 mV (vs. SHE<sup>7</sup>), e do Cu/CuSO<sub>4</sub> como +318 mV (vs. SHE<sup>7</sup>).

**Tabela 4.5 – Limites de potencial para as respectivas probabilidades de corrosão**

Probabilidade de corrosão	Potenciais de corrosão	
	ER Cu/CuSO <sub>4</sub> ASTM C876-91 (2009)	ER Ag/AgCl/KCl <sub>sat</sub> convertido
< 10%	E <sub>corr</sub> > -200 mV	E <sub>corr</sub> > -104 mV
Incerta	-350 mV < E <sub>corr</sub> < -200 mV	-254 mV < E <sub>corr</sub> < -104 mV
> 90%	E <sub>corr</sub> < -350 mV	E <sub>corr</sub> < -254 mV

<sup>7</sup> Sigla em inglês para Standard Hydrogen Electrode (Eletrodo de Hidrogênio Padrão).

Deste modo, considerando o eletrodo de referência de Ag/AgCl utilizado na experimentação, os valores de  $E_{\text{corr}}$  mais negativos que -254 mV indicam um estado ativo do processo corrosivo da barra de aço em análise, com a probabilidade de corrosão superior a 90%. Valores mais positivos que -104 mV indicam um estado passivo, com a probabilidade de corrosão inferior a 10%. A probabilidade de corrosão é considerada incerta para o intervalo entre -104 mV e -254 mV.

O ensaio foi finalizado no momento em que dois ciclos completos e consecutivos, de secagem e umedecimento, apresentassem valores de potencial inferiores ao valor crítico para o estado de corrosão ativo, ou seja, valores abaixo de -254 mV. Esse procedimento de parada foi utilizado por Ribeiro (2010). Essa verificação de parada se deu na 18ª semana, onde todas as amostras apresentaram valores de potencial de corrosão abaixo do limite estipulado.

#### **f) Taxa de corrosão pela curva de polarização**

Após o encerramento do ensaio, verificou-se a taxa de corrosão das barras de aço por meio da técnica de curvas de polarização. O ensaio foi realizado na 22ª semana quando todas as barras de aço já haviam sido despassivadas.

Devido ao método ser de natureza destrutiva, tendo em vista às altas polarizações, optou-se apenas em realizar esta análise após o término das medidas de potencial, evitando, assim, que as perturbações geradas durante as polarizações não influenciassem no processo de corrosão.

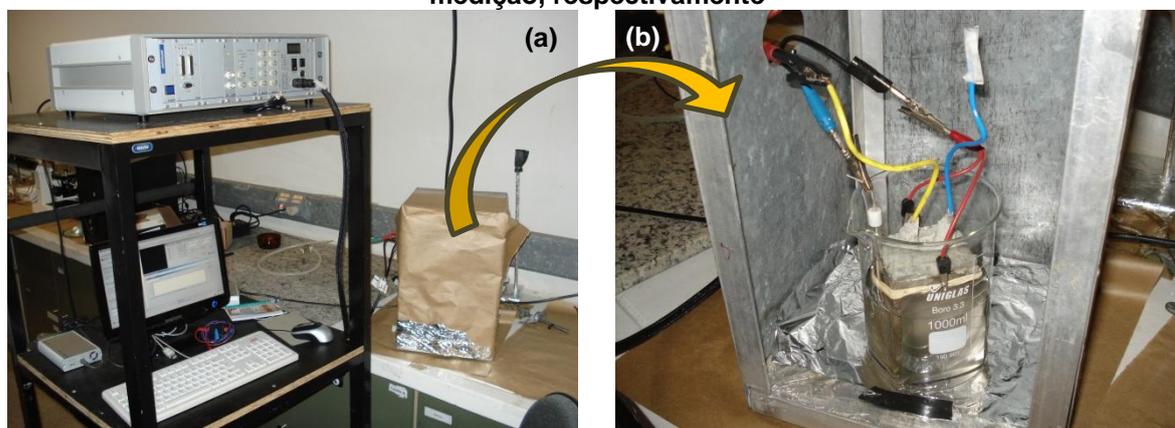
Para isso, as curvas de polarização foram analisadas apenas para as amostras que apresentaram os menores valores de potencial de corrosão, dentre os três corpos de prova de cada traço.

As medidas foram realizadas no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica Cerâmica (LIEC-UFSCar), utilizando um potenciostato da marca Eco Chemie, modelo Autolab 20 (Figura 4.46a). Com este equipamento, foram obtidas as curvas de polarização potenciostáticas, as quais tratam da resposta de corrente em função do potencial aplicado, controlando a varredura catódica e anódica a uma velocidade linear.

Foi utilizada uma célula eletroquímica baseada nos trabalhos de Ismail e Soleymani (2002). O corpo de prova saturado foi mergulhado em um Becker de vidro com solução aquosa de NaCl 3,5%, e conectado ao potenciostato. No sistema, ainda foi utilizado um eletrodo de referência de Ag/AgCl/KCl<sub>sat</sub> (o mesmo utilizado para as medidas de potencial de corrosão) e um contraeletrodo de titânio. Além disso, o sistema foi alocado em uma gaiola

de Faraday para isolar qualquer campo magnético gerado pelo meio externo, evitando possíveis interferências no ensaio (Figura 4.46b).

**Figura 4.46 – Potenciostato em funcionamento e gaiola de Faraday contendo o sistema de medição, respectivamente**



(Fonte: próprio autor)

Em vista de melhorar o desempenho do sistema, o contraeletrodo de titânio, eletroquimicamente inerte à análise, foi considerado em duas chapas com mesmas dimensões que o corpo de prova (70 x 100 mm), posicionados em faces opostas. O uso destas chapas como contraeletrodos foi justificado por apresentarem tamanhos bem maiores do que o eletrodo de trabalho (armadura), gerando um campo magnético uniforme e alta densidade de corrente, cujas medições pudessem ser verificadas com expressividade.

Além disso, foram utilizados os corpos de prova saturados e as medidas realizadas em solução aquosa de NaCl 3,5%, a fim de minimizar os fortes efeitos de queda ôhmica provocada pelo cobrimento do concreto. Segundo Cascudo (1997), a dificuldade de análise eletroquímica é maior quando o cobrimento das armaduras aumenta, pois os valores de corrente e potencial relacionados aos processos de corrosão são mascarados pela alta resistência da camada de concreto.

Com o potenciostato, foi feita uma varredura linear no sentido anódico a 0,5 mV/s. A partir do  $E_{corr}$  (potencial de circuito aberto), foi analisada uma faixa de 350 mV tanto no sentido anódico quanto no catódico. A polarização partiu do potencial mais negativo e terminou no potencial mais positivo, sendo o potencial inicial igual a ( $E_{corr} - 350$  mV) e o final igual a ( $E_{corr} + 350$  mV). Essa metodologia experimental permitiu a detecção de corrente mesmo em um sistema altamente resistivo.

Para detectar alterações no perfil das curvas, as barras foram polarizadas e, a partir dos gráficos de corrente e potencial, foi feito o tratamento matemático das curvas para obter as retas de Tafel (logaritmo do módulo da corrente pelo potencial). Com a extrapolação

dessas retas, foi possível verificar os valores da corrente instantânea de corrosão ( $I_{corr}$ ) e do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).

A partir do valor obtido de  $I_{corr}$ , foi possível estimar a taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) das armaduras, em  $\mu A/cm^2$  e  $\mu m/ano$ , a partir das relações descritas nas Equações 19 e 20, respectivamente. Em especial, a Equação 20 foi apresentada por Ismail e Soleymani (2002).

$$i_{corr} [\mu A/cm^2] = \frac{I_{corr}}{A} \quad (19)$$

$$i_{corr} [\mu m/ano] = \frac{3,27 * I_{corr} * EW}{A * d} \quad (20)$$

Onde,

$I_{corr}$  = corrente instantânea de corrosão, em  $\mu A$ ;

$A$  = área de exposição, sendo adotado para o ensaio o valor de  $15,83 \text{ cm}^2$ ;

$EW$  = peso da parte não revestida da barra sujeita à corrosão, sendo adotado o valor de  $6,15 \text{ g}$ ;

$d$  = densidade, sendo adotado para o aço CA-60 o valor de  $7,85 \text{ g/cm}^3$ .

Embora não haja ainda critérios definidos para relacionar a taxa de corrosão com o grau de deterioração da armadura e a importância do ataque, Andrade e Alonso (2001) propõem critérios de avaliação da corrosão a partir de dados obtidos em experiências de campo e em laboratório. Esses critérios estão apresentados na Tabela 4.6.

<b>Tabela 4.6 – Critérios de avaliação da velocidade de corrosão</b>	
<b>Grau de corrosão</b>	<b>Taxa de corrosão (<math>\mu A/cm^2</math>)</b>
Desprezível	< 0,1
Iniciação com nível baixo de corrosão	Entre 0,1 e 0,5
Nível moderado, mas não severo	Entre 0,5 e 1,0
Nível alto de corrosão	> 1,0
Ataque muito severo	> 10,0

(Fonte: Andrade e Alonso, 2001)

Deste modo, foi possível avaliar o grau de corrosão apresentado pelas barras de aço em cada um dos concretos em estudo.

### g) Taxa de corrosão pela perda de massa das armaduras

Além da velocidade de corrosão verificada pelas curvas de polarização, verificou-se a taxa de corrosão pela perda de massa das barras de aço conforme metodologia utilizada por Ribeiro (2010).

Os corpos de prova prismáticos de concreto foram rompidos manualmente e as barras de aço retiradas. Em seguida, elas foram limpas conforme procedimento descrito no item a, e pesadas para verificar a perda de massa, comparando com o valor da massa antes do início do ensaio. A limpeza das barras apenas se diferenciou pelo aumento do tempo de imersão, devido a uma maior deposição de material corroído sobre as barras. Inicialmente, as barras foram imersas durante 25 minutos em solução de ácido clorídrico 1:1, com 3,5 g/L de hexametilenotetramina (ao invés de 10 minutos) e, depois, foram imersas em acetona por cinco minutos (ao invés de dois minutos).

A taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) foi estimada conforme Equação 21, apresentada por Ribeiro (2010).

$$i_{corr} = \frac{K * W}{A * t * d} \quad (21)$$

Onde,

$K = 8,76 \cdot 10^7$  (para TC  $\mu\text{m}/\text{ano}$ ); ou  $8,76 \cdot 10^7 \cdot d$  (para TC  $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ );

$W$  = perda de massa (g);

$A$  = área de exposição ( $\text{cm}^2$ ), sendo adotado para o ensaio o valor de  $15,83 \text{ cm}^2$ ;

$t$  = tempo de exposição (h);

$d$  = densidade, sendo adotado para o aço CA-60 o valor de  $7,85 \text{ g}/\text{cm}^3$ .

#### 4.2.14 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS

Paralelamente ao ensaio de potencial de corrosão, amostras cilíndricas de concreto foram submetidas às mesmas condições de aceleração de secagem e umedecimento para verificação da frente de penetração de cloretos.

Para o estudo, foram moldados três corpos de prova de cada traço (CR, C30 e C50). Cada ciclo foi composto por um semiciclo de secagem (cinco dias em estufa a  $50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  com ventilação de ar) e um semiciclo de umedecimento (dois dias de imersão total em solução salina de 3,5% de NaCl).

Ao final do ensaio de potencial de corrosão, ou seja, após 24 semanas (168 dias), os corpos de prova foram rompidos à compressão diametral, e tratados com solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) e fluoresceína sobre a superfície rompida para verificação da frente de penetração de cloretos. A metodologia utilizada foi a mesma daquela aplicada para a verificação da penetração de cloretos das argamassas (item 4.2.8).

Após a secagem das soluções, a região onde se verificou a formação de um precipitado branco ( $\text{AgCl}$ ), em contraponto à região de coloração mais escura, indicou a presença de cloretos livres. A espessura desta região foi medida, a partir da borda do corpo de prova, com auxílio de um paquímetro digital.

Este ensaio é um indicativo da resistência à penetração dos íons cloretos nos concretos, sendo que, as amostras com menores espessuras podem apresentar uma resistência maior a este ataque.

# 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos procedimentos experimentais descritos no Capítulo 4.

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir, são apresentadas as caracterizações dos materiais utilizados na pesquisa: areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), areia natural, pedra britada e aço CA-60.

### 5.1.1 AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A caracterização química da ACBC, cujos resultados foram normalizados para 100%, foi apresentada na Tabela 5.1.

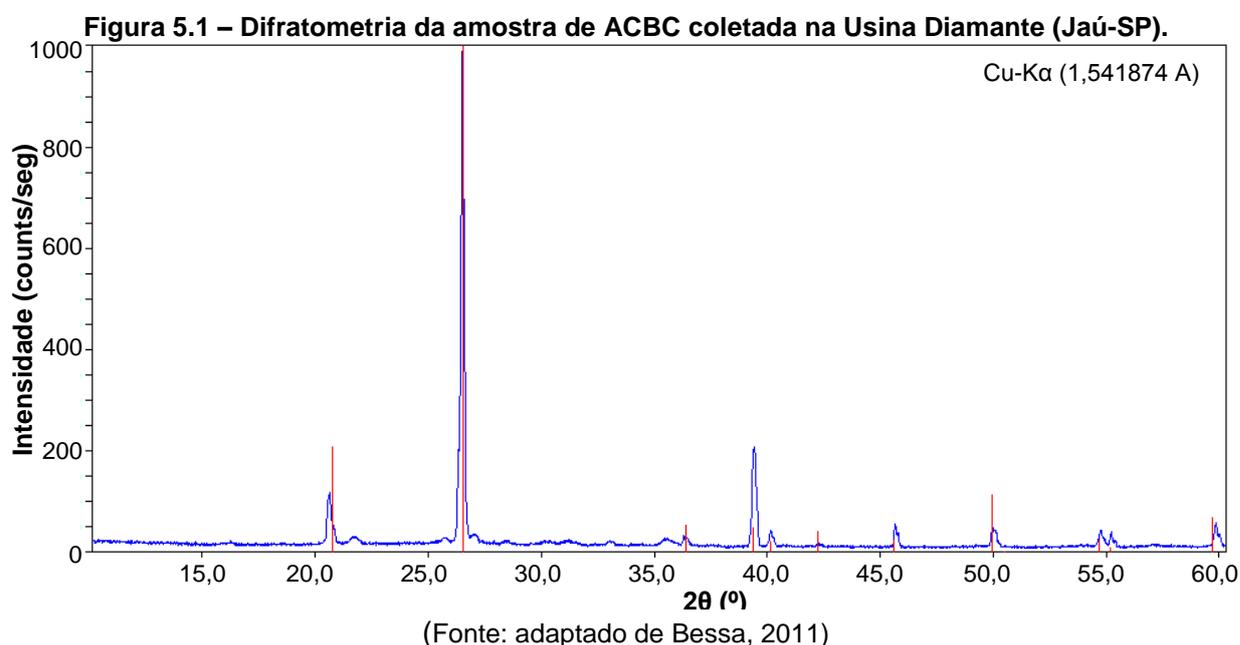
**Tabela 5.1 – Composição química da ACBC (em %)**

<b>Elementos</b>	<b>ACBC <i>in natura</i></b>	<b>ACBC padronizada</b>
SiO <sub>2</sub>	80,2	80,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,6	5,8
K <sub>2</sub> O	4,0	3,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	2,5
CaO	1,8	1,6
MgO	1,6	1,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,4	1,4
TiO <sub>2</sub>	1,4	1,3
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,2
MnO	0,2	0,1
SO <sub>3</sub>	0,1	0,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1	< 0,1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 0,1	< 0,1
ZrO <sub>2</sub>	< 0,1	< 0,1
SrO	< 0,1	< 0,1
Perda ao fogo	0,80	0,70

A análise química semiquantitativa apresentada possui certo caráter subjetivo e interpretativo. Deste modo, variações na ordem de  $\pm 10\%$  são aceitáveis nas concentrações obtidas, bem como falsas indicações positivas ou negativas de elementos em baixas concentrações. Por essa análise, portanto, pode-se perceber que o procedimento de padronização adotado não provocou nenhuma alteração na composição química da ACBC. As análises subsequentes foram realizadas considerando apenas a ACBC padronizada.

As amostras de areia de cinza apresentam composições químicas semelhantes às de outros autores (CORDEIRO et al., 2009; SOUZA et al., 2011; FARIA et al., 2012). Em especial, o estudo apresentado por Sales & Lima (2010) utilizou amostras da mesma usina, indicando a baixa variabilidade da ACBC produzida.

Quanto à estrutura da sílica, pela difratometria de raios X estudada por Bessa (2011), pode-se inferir que a amostra de ACBC coletada na Usina Diamante se apresenta na estrutura cristalina de quartzo-alfa. A identificação pelo difratograma pode ser verificada na Figura 5.1, na qual se verifica a amostra de ACBC (traçado azul), em coincidência com os picos de difração característicos para o quartzo-alfa ( $\text{SiO}_2$  ( $\alpha$ )) (linha vermelha).



Conforme apresentado na Figura 5.1, a estrutura da ACBC estudada apresenta alto grau de cristalinidade, pois apresenta picos de difração bem definidos e baixo nível de ruído (ausência de halo amorfo).

De acordo com MINDAT (2012), a sílica apresenta transição de fase reversível, a pressão ambiente, do quartzo-alfa para o quartzo-beta a uma temperatura de  $573^{\circ}\text{C}$ .

Considerando a temperatura de queima do bagaço, utilizada na Usina Diamante (local da coleta), entre 750° e 800°C, pode-se questionar a estrutura da sílica da ACBC como sendo quartzo-beta. Entretanto, devido à instabilidade da estrutura do quartzo-beta à temperatura e pressão ambiente, após o seu resfriamento, a estrutura retorna à fase alfa.

Além disso, é descartada a hipótese da estrutura da sílica estudada ser lamelar, devido à ausência de picos de difração em baixos ângulos.

Deste modo, a partir da análise por difratograma de raios X, a ACBC pode ser classificada como predominantemente quartzo-alfa.

Para mais, foram verificadas as características físicas da ACBC. A análise granulométrica da ACBC padronizada e isolada foi apresentada na Tabela 5.2. O resíduo tratado apresentou dimensão máxima de 1,18 mm.

**Tabela 5.2 – Granulometria da ACBC**

Peneira (mm)	% Retida Acumulada		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
6,30	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00
2,36	1,10	1,40	1,25
1,18	3,96	4,46	4,21
0,60	8,22	8,68	8,45
0,30	36,98	37,03	37,01
0,15	64,38	64,45	64,42
Fundo	100,00	100,00	100,00
<b>DMC</b> <sup>(1)</sup>	1,18 mm	1,18 mm	1,18 mm
<b>MF</b> <sup>(2)</sup>	1,15	1,16	1,15

<sup>(1)</sup> Dimensão máxima característica

<sup>(2)</sup> Módulo de finura

Pelo fato do valor do módulo de finura obtido ter sido igual a 1,15, não foi possível classificar a ACBC isolada em nenhuma das faixas definidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para agregado miúdo.

Entretanto, a NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica que, quando o agregado miúdo for de origens diferentes, os requisitos propostos devem ser considerados proporcionalmente à presença de cada um deles na mistura. Desta forma, foi realizada a composição granulométrica do agregado miúdo, areia natural e ACBC, nos teores utilizados nas argamassas e concretos, ou seja, 30% e 50% de ACBC em substituição à areia natural (teor em massa).

Na Tabela 5.3 foram apresentados os valores das médias da composição granulométrica do agregado miúdo, considerando 30% e 50% de substituição da areia natural.

**Tabela 5.3 – Granulometria da composição do agregado miúdo (areia + ACBC)**

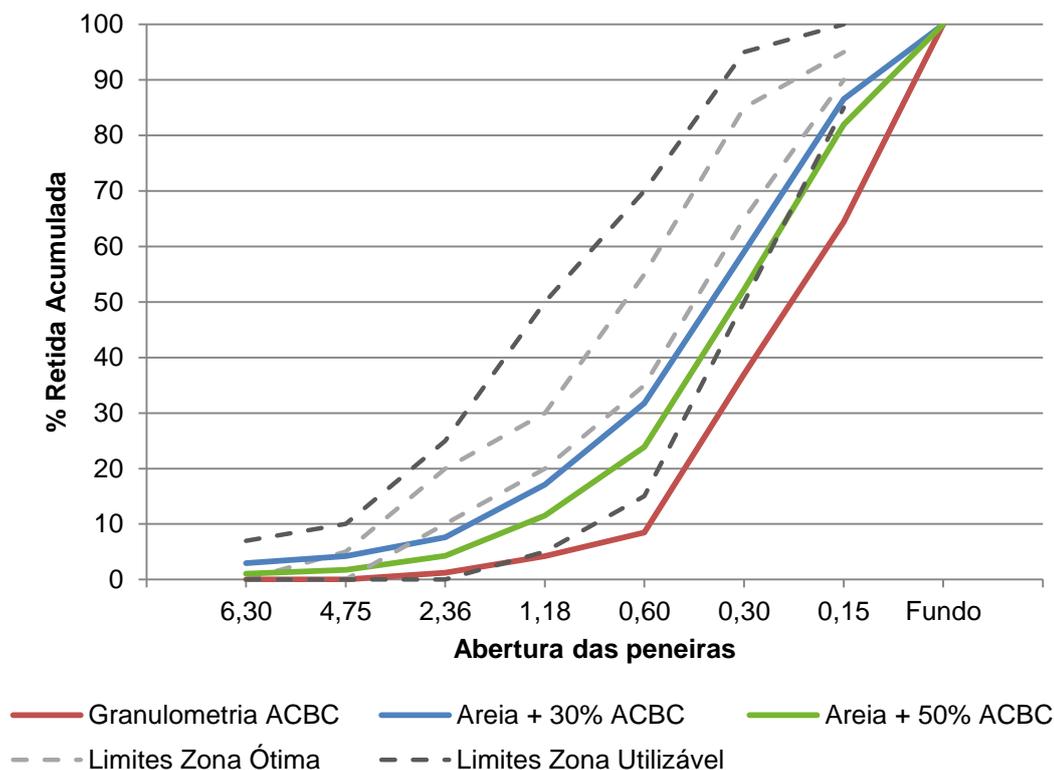
Peneira (mm)	Média das % Retidas Acumuladas	
	Areia + 30% ACBC	Areia + 50% ACBC
6,30	2,97	1,03
4,75	4,23	1,77
2,36	7,63	4,29
1,18	17,11	11,51
0,60	31,78	23,87
0,30	59,04	52,21
0,15	86,57	81,98
Fundo	99,95	99,99
<b>DMC</b> <sup>(1)</sup>	4,75 mm	2,36 mm
<b>MF</b> <sup>(2)</sup>	2,06	1,76

<sup>(1)</sup> Dimensão máxima característica

<sup>(2)</sup> Módulo de finura

As curvas granulométricas foram apresentadas na Figura 5.2.

**Figura 5.2 – Curvas granulométricas da ACBC e composição do agregado miúdo (ACBC + areia)**



(Fonte: próprio autor)

É possível verificar que a distribuição granulométrica da ACBC isolada ficou fora dos limites de zona utilizável do agregado miúdo. Por outro lado, como os módulos de finura de ambas as composições (30% e 50% de ACBC) ficaram entre 1,55 e 2,20, respectivamente, elas puderam ser classificadas na zona utilizável, sendo que a composição granulométrica com 30% de ACBC ficou mais próxima aos limites compreendidos pela zona ótima.

Os resultados dos demais ensaios realizados para a caracterização da ACBC foram apresentados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4 – Caracterização da ACBC**

<b>Propriedades</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>
Material pulverulento	%	16,18
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	2,57
Massa unitária no estado seco e solto	kg/m <sup>3</sup>	1.690,55
Índice de vazios	%	34,07
Absorção de água	%	0,90

### 5.1.2 AREIA NATURAL

O ensaio de granulometria também foi realizado para a areia natural. A dimensão máxima característica do agregado foi de 6,3 mm. A composição granulométrica foi apresentada na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 – Granulometria da areia natural**

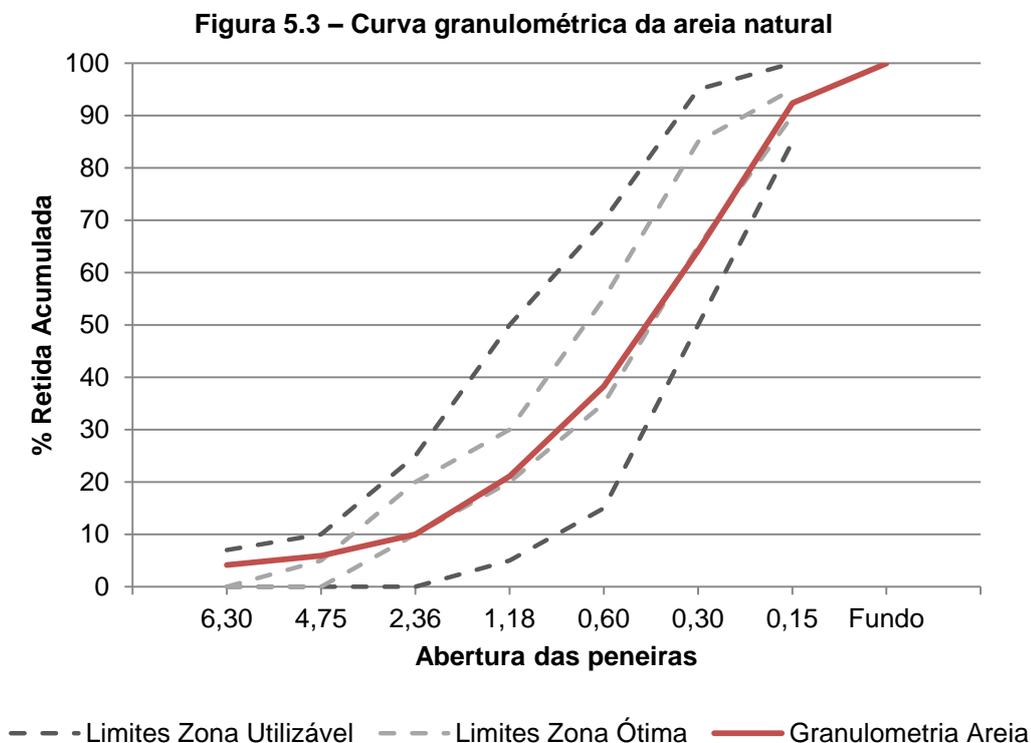
<b>Peneira (mm)</b>	<b>% Retida Acumulada</b>		
	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Média</b>
6,30	4,15	4,12	4,14
4,75	5,48	6,36	5,92
2,36	9,53	10,48	10,01
1,18	23,94	18,23	21,09
0,60	40,09	36,51	38,30
0,30	65,17	63,25	64,21
0,15	88,58	96,21	92,40
Fundo	99,95	99,99	99,97
<b>DMC</b> <sup>(1)</sup>	6,3 mm	6,3 mm	6,3 mm
<b>MF</b> <sup>(2)</sup>	2,33	2,31	2,32

<sup>(1)</sup> Dimensão máxima característica

<sup>(2)</sup> Módulo de finura

Considerando a média do módulo de finura obtida nos ensaios, pode-se definir que a areia natural utilizada se encontra na zona ótima, de acordo com os limites estipulados pela NBR 7211 (ABNT, 2009), definidos entre 2,20 e 2,90. A representação gráfica da distribuição granulométrica pode ser verificada na Tabela 5.3, bem como os limites definidos

por essa norma. Nota-se que a curva granulométrica da areia ficou, em quase a sua totalidade, dentro dos limites definidos pela zona ótima.



(Fonte: próprio autor)

A caracterização do agregado miúdo convencional pode ser verificada na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6 – Caracterização da areia natural**

Propriedades	Unidade	Resultado
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	2,45
Massa unitária no estado seco e solto	kg/m <sup>3</sup>	2.041,37
Absorção de água	%	0,54

### 5.1.3 PEDRA BRITADA

Por meio do ensaio de granulometria, verificou-se que a dimensão máxima característica do agregado graúdo foi de 19 mm. A distribuição granulométrica foi apresentada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Granulometria da pedra britada

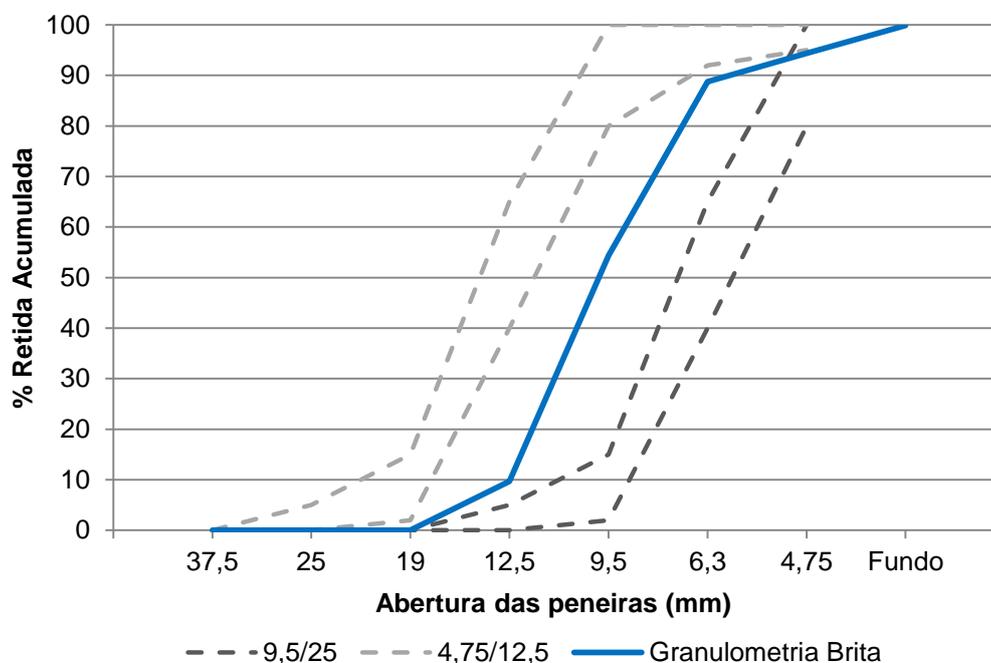
Peneira (mm)	% Retida Acumulada		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
37,5	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
12,5	10,60	8,80	9,70
9,5	57,00	51,70	54,35
6,3	90,20	87,30	88,75
4,75	96,10	92,70	94,40
Fundo	99,90	99,90	99,90
<b>DMC</b> <sup>(1)</sup>	19 mm	19 mm	19 mm
<b>MF</b> <sup>(2)</sup>	1,53	1,44	1,49

<sup>(1)</sup> Dimensão máxima característica

<sup>(2)</sup> Módulo de finura

A representação gráfica da granulometria da pedra britada foi apresentada na Figura 5.4, juntamente com os limites da composição granulométrica definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). A granulometria da pedra britada está situada entre as zonas 9,5/25 e 4,75/12,5. Cada zona é delimitada por um par de valores, que correspondem, em milímetros, a menor e a maior dimensão do agregado graúdo, respectivamente.

Figura 5.4 – Curva granulométrica da pedra britada



(Fonte: próprio autor)

A caracterização da pedra britada pode ser verificada na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 – Caracterização da pedra britada**

<b>Propriedades</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	2,63
Massa unitária no estado seco e solto	kg/m <sup>3</sup>	982,13
Massa unitária compactada	kg/m <sup>3</sup>	1.578,42
Absorção de água	%	0,25

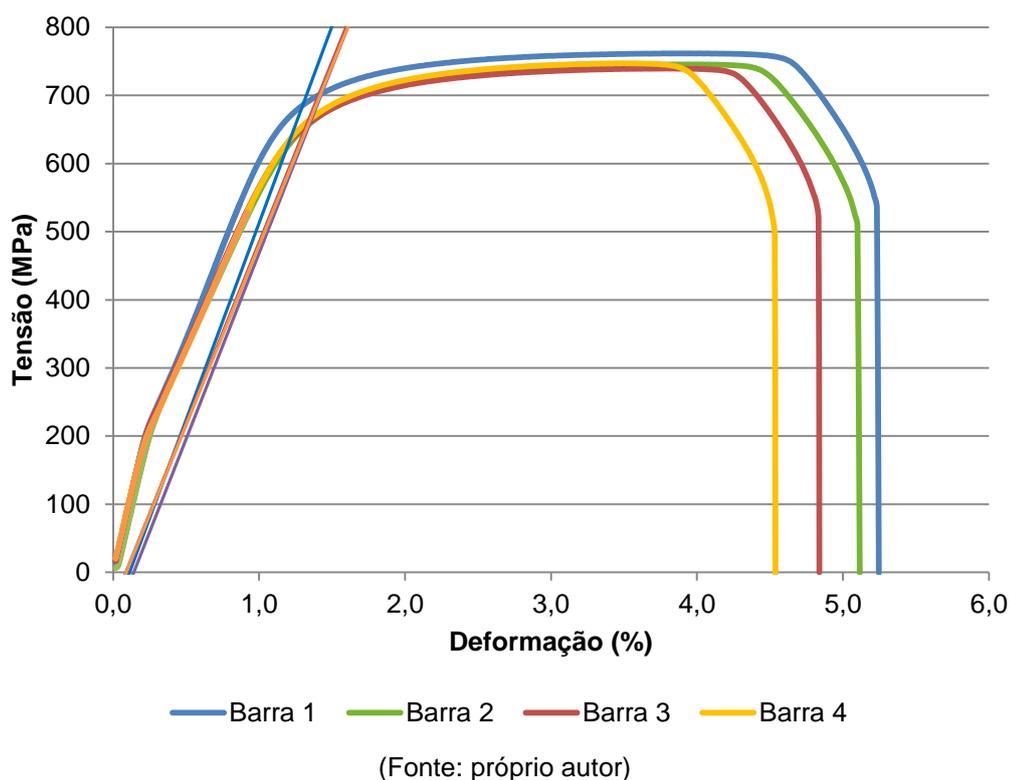
#### 5.1.4 AÇO CA-60

A caracterização do aço CA-60, por meio de ensaios mecânicos com quatro amostras, foi apresentada na Tabela 5.9

**Tabela 5.9 – Caracterização do aço CA-60**

<b>Barras</b>	<b>Tensão de ruptura (MPa)</b>	<b>Tensão de escoamento 0,2% (MPa)</b>	<b>Alongamento na ruptura (%)</b>
Barra 1	761,58	647,49	5,25
Barra 2	745,42	632,70	5,12
Barra 3	739,44	635,60	4,84
Barra 4	747,09	640,33	4,54
<b>Média</b>	<b>748,38</b>	<b>645,78</b>	<b>4,93</b>
Desvio padrão	9,39	19,39	0,31
Coef. de Variação (%)	1,25	3,00	6,37

Além disso, foi elaborado um diagrama mostrando o comportamento das quatro barras ensaiadas (tensão *versus* deformação), bem como a projeção das retas para determinação da tensão de escoamento a 0,2% de deformação permanente (Figura 5.5). Pode-se notar que a resistência de escoamento das quatro barras ensaiadas ficaram acima de 600 MPa, condizente com o aço CA-60.

**Figura 5.5 – Diagrama tensão-deformação para as barras CA-60**

Todos os valores obtidos neste ensaio ficaram de acordo com os limites mínimos exigidos pela NBR 7480 (2007).

## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS

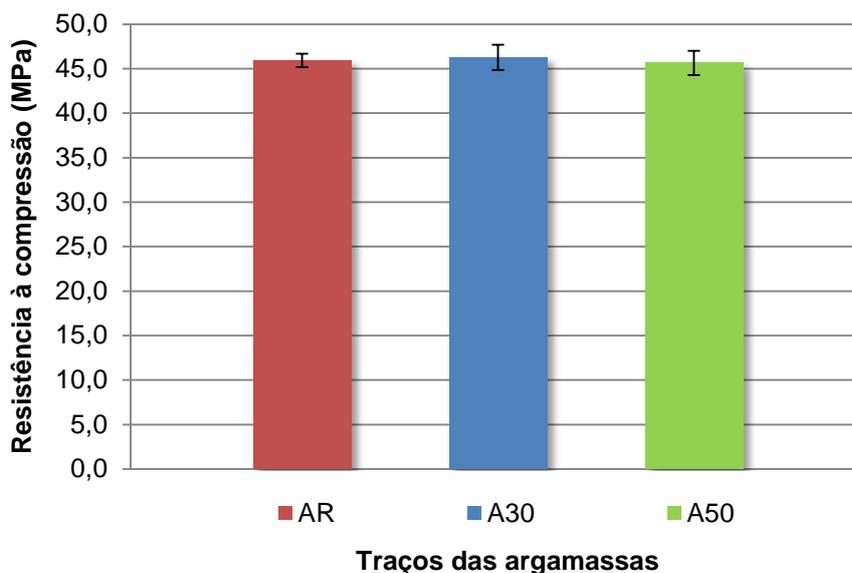
Os valores do ensaio de resistência à compressão simples das argamassas, aos 28 dias, foram apresentados na Tabela 5.10, cujos resultados apresentaram coeficientes de variação (relação entre o desvio padrão e a média) inferiores a 3,0%.

**Tabela 5.10 – Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias**

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
AR	45,9	0,8	2%
A30	46,3	1,4	3%
A50	45,6	1,4	3%

A representação gráfica do ensaio de resistência à compressão simples das argamassas, aos 28 dias, foi apresentada no histograma da Figura 5.6, com as respectivas indicações do desvio padrão de cada traço.

**Figura 5.6 – Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias**



(Fonte: próprio autor)

Para um nível de significância  $\alpha$  de 5%, pela análise estatística de variância (ANOVA) tem-se que as três argamassas estudadas não apresentaram uma diferença significativa de resistência entre elas. Isso pode ser verificado na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11 – Análise de variâncias do ensaio de resistência à compressão das argamassas**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	0,81105	2	0,405525	<b>0,275504</b>	0,765367	<b>4,256495</b>
Erro	13,24743	9	1,471937			
Total	14,05848	11				<i>não significativo</i>

Como o valor de F é menor do que o valor de F crítico, não se pode rejeitar a hipótese  $H_0$ , onde considera que as médias das resistências à compressão dos três traços de argamassas estudados são estatisticamente equivalentes, a um nível de significância de 5%. Desta forma, as médias de resistências não tem diferença significativa a ponto de se atribuir alguma interferência da ACBC nesta propriedade das argamassas.

Além disso, deve-se considerar que os traços foram moldados com diferentes valores de relação água/cimento ( $a/c$ ). Apesar de as argamassas com ACBC apresentarem maiores quantidades de água em suas composições, observou-se a mesma resistência à compressão da argamassa de referência. Isso mostra que, efetivamente, para uma mesma proporção de materiais, o uso da ACBC pode demandar mais água no preparo de concretos e argamassas sem prejuízo de resistência, conforme afirmado por Macedo (2009). Este fato

pode estar relacionado à maior finura da ACBC, o que leva a apresentar uma maior área superficial e demandar uma maior quantidade de água para sua mistura.

Martins & Machado (2009) também analisaram a resistência à compressão de argamassas utilizando a ACBC como agregado miúdo. Para a idade de 28 dias, a substituição de até 50% de ACBC, com mesma relação a/c (valor de 0,55), apresentou um aumento na resistência à compressão simples. As argamassas atingiram resistências de 19,3 MPa, 21,6 MPa e 21,8 MPa, para 0%, 25% e 50% de substituição. Para substituições maiores do que 50% houve uma diminuição na resistência à compressão das argamassas. Segundo os autores, este fato foi atribuído à maior absorção de água pelas partículas de ACBC, o que demandou um maior volume de água ( $a/c = 0,60$ ) para hidratação do cimento, deixando a argamassa mais porosa.

Em estudos com a aplicação da CBC como substituto parcial do cimento, Chi (2012) investigou algumas propriedades de argamassas com 10%, 20% e 30% de substituição do cimento, e relação a/c constante de 0,55. Os resultados indicaram que as amostras com 10% de CBC apresentaram desempenho superior na resistência à compressão.

Em outra pesquisa utilizando a CBC como substituto do cimento Portland, Oliveira et al. (2010) constataram que a adição de até 20% sobre a massa do cimento não alterava a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.

Desta forma, pode-se afirmar que, mesmo com a variação da relação a/c nas argamassas analisadas, foi possível obter o mesmo valor de resistência à compressão com a incorporação da ACBC nos teores de 30% e 50% sobre a areia natural.

### 5.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS

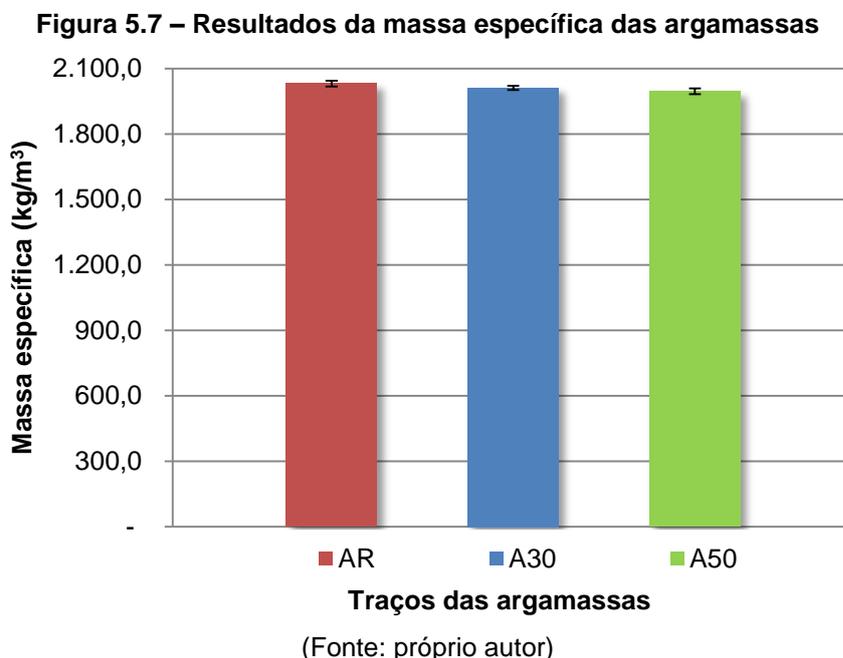
A caracterização física das argamassas, aos 28 dias de idade, se deu pelas propriedades de massa específica, absorção de água, índice de vazios e análise dos diâmetros dos poros.

Os resultados com as médias do ensaio de massa específica foram apresentados na Tabela 5.12.

**Tabela 5.12 – Resultados do ensaio de massa específica das argamassas**

Traço	Massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )	Desvio Padrão ( $\text{kg/m}^3$ )	Coefficiente de variação (%)
AR	2.030,59	13,15	1%
A30	2.011,13	9,90	1%
A50	1.995,46	12,63	1%

Além disso, foi possível elaborar um histograma da massa específica das três argamassas estudadas, conforme verificado na Figura 5.7.



Essa diferença de valores da massa específica apenas pode ser considerada significativa comparando a argamassa de referência (AR) com a argamassa A50 (50% de substituição por ACBC). Isso pode ser verificado a partir da análise de variância (ANOVA, Tabela 5.13), seguido pelo Teste de Tukey para comparação em par de médias, considerando, em ambos os testes, um nível de significância de 5%.

**Tabela 5.13 – ANOVA para a massa específica das argamassas**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	3.097,2760	2	1548,638	<b>10,7958</b>	0,0021	<b>3,8853</b>
Erro	1.721,3852	12	143,4488			
Total	4.818,6613	14				<i>significativo</i>

Como o valor de F é maior do que o valor de F crítico, pode-se rejeitar a hipótese nula  $H_0$ , a qual afirma que as três amostras analisadas (AR, A30 e A50) são idênticas. Neste caso, realizou-se o Teste de Tukey (T) para verificação de qual par de médias poderiam ser consideradas significativamente diferentes. O resultado desta análise pode ser verificado na Tabela 5.14.

**Tabela 5.14 – Teste de Tukey para massa específica das argamassas**

	AR	A30	AR	A50	A30	A50
Média	2.030,59	2.011,13	2.030,59	1.995,46	2.011,13	1.995,46
Variância	172,89	98,04	172,89	159,42	98,04	159,42
Observações	5	5	5	5	5	5
Correlação de Pearson	-0,2245		0,6539		0,0840	
Grau de liberdade	4		4		4	
T	<b>2,3972</b>		<b>7,3192</b>		<b>2,2793</b>	
P(T<=t) bi-caudal	0,0746		0,0019		0,0848	
t crítico bi-caudal	<b>2,7764</b>		<b>2,7764</b>		<b>2,7764</b>	
	<i>não significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Deste modo, pelo teste estatístico, constatou-se que apenas a diferença das médias entre as argamassas AR e A50 são significativamente diferentes, mostrando que a substituição de até 30% de ACBC na argamassa não provocou variação da sua massa específica. Mesmo assim, a diminuição nos valores de massa específica entre do AR e A50 foi inferior a 2%, podendo ser considerados sem grande relevância.

Oliveira et al. (2010) também observaram uma pequena variação nos valores de massa específica das argamassas com adição da CBC, da ordem de 0,5%. Os autores concluíram que a substituição parcial do cimento pela CBC em até 30% não provocou qualquer modificação significante nos valores de massa específica das argamassas.

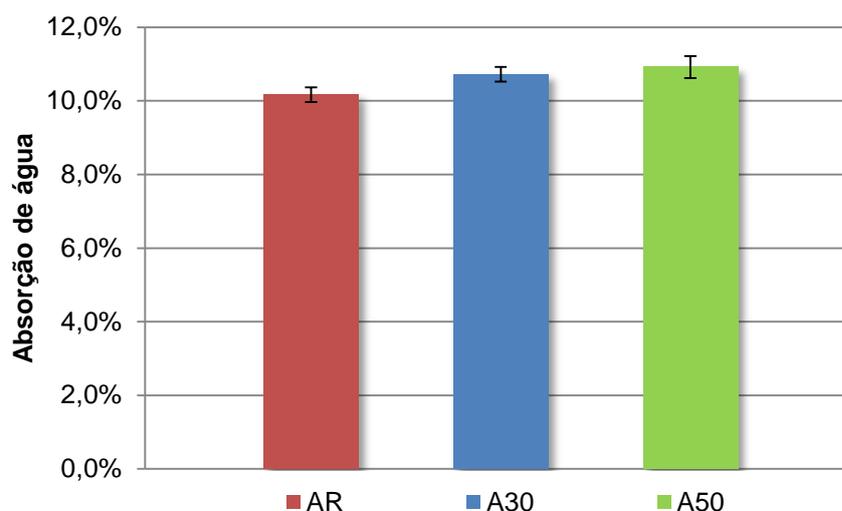
Outra propriedade física analisada foi a absorção de água das argamassas por imersão. Na Tabela 5.15 foram apresentadas as médias dos resultados do ensaio de absorção.

**Tabela 5.15 – Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas**

Traço	Absorção (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
AR	10,2	0,2	2%
A30	10,7	0,2	2%
A50	10,9	0,3	3%

Esses resultados também foram apresentados em forma gráfica, como se pode verificar na Figura 5.8.

**Figura 5.8 – Resultados do ensaio de absorção de água das argamassas**



**Traços das argamassas**  
(Fonte: próprio autor)

Para verificarmos se essa variação nos valores é significativa, realizou-se o teste ANOVA, com nível de significância de 5%, cuja análise pode ser conferida na Tabela 5.16.

**Tabela 5.16 – ANOVA para a absorção das argamassas**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	0,0001523	2	7,62E-05	<b>12,5519</b>	0,0011	<b>3,8853</b>
Erro	0,0000073	12	6,07E-06			
Total	0,0002251	14				<i>significativo</i>

Pelo valor de F ser maior do que o F crítico, existe uma diferença de valores significativa a ponto de rejeitarmos a hipótese nula  $H_0$ . Deste modo, pelo Teste T verificaram-se quais pares de médias apresentaram diferenças significativas a um nível de 5%, como apresentado na Tabela 5.17.

**Tabela 5.17 – Teste de Tukey para absorção das argamassas**

	AR	A30	AR	A50	A30	A50
Média	0,1072	0,1017	0,1092	0,1017	0,1092	0,1072
Variância	3,65 E-06	4,07 E-06	1,05 E-05	4,08 E-06	1,05 E-05	3,65 E-06
Observações	5	5	5	5	5	5
Correlação de Pearson	-0,3396		0,7623		0,2228	
Grau de liberdade	4		4		4	
T	<b>3,8522</b>		<b>7,8587</b>		<b>1,3206</b>	
P(T<=t) bi-caudal	0,0183		0,0014		0,2571	
t crítico bi-caudal	<b>2,7764</b>		<b>2,7764</b>		<b>2,7764</b>	
	<i>significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Tanto as argamassas A30 como A50 apresentaram uma diferença significativa de absorção de água em relação à argamassa de referência. Com isso, pode-se inferir que o uso da ACBC como areia natural pode provocar um aumento na absorção de água da argamassa. Mesmo assim, esse aumento é relativamente pequeno, na ordem de 5% e 7% para as argamassas com 30% e 50% de ACBC, respectivamente.

Utilizando a mesma metodologia de ensaio, a absorção de água das argamassas foi verificada por Oliveira et al. (2010). Neste estudo, os autores também observaram um ligeiro aumento dos valores de absorção para as argamassas com adição de até 30% de CBC sobre a massa do cimento Portland.

Ainda em estudos de argamassa contendo CBC como adição em cimento, Chi (2012) observou uma manutenção dos valores de absorção de água para teores de até 10% de substituição. As argamassas analisadas contendo 20% e 30% não apresentaram desempenho satisfatório desta propriedade física.

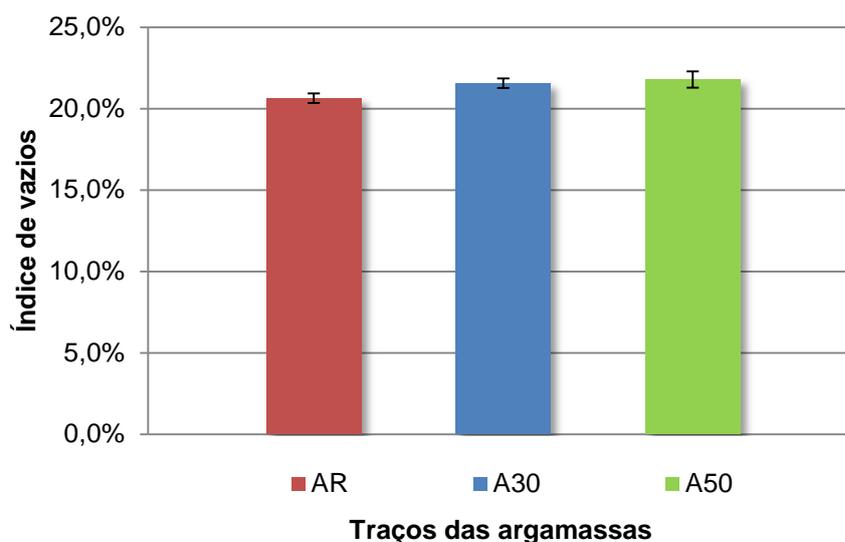
Para verificação do índice de vazios das argamassas utilizou-se metodologia de análise semelhante às demais propriedades físicas. Esse ensaio consistiu em verificar a relação entre o volume dos poros permeáveis e o volume total da argamassa. A Tabela 5.18 apresenta as médias dos resultados desse ensaio.

**Tabela 5.18 – Resultados do ensaio de índice de vazios das argamassas**

<b>Traço</b>	<b>Índice de vazios (%)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
AR	20,6	0,3	2%
A30	21,6	0,3	1%
A50	21,8	0,5	2%

Esses valores podem ser verificados, também, no gráfico apresentado na Figura 5.9.

**Figura 5.9 – Resultados do ensaio de índice de vazios das argamassas**



(Fonte: próprio autor)

Além disso, verificou-se a consistência dos resultados pela análise de variância (ANOVA), com nível de significância  $\alpha$  de 5%, conforme apresentado na Tabela 5.19.

**Tabela 5.19 – ANOVA para o índice de vazios das argamassas**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	0,000367	2	0,000184	<b>12,3808</b>	0,0012	<b>3,8853</b>
Erro	0,000178	12	1,48E-05			
Total	0,000545	14				<i>significativo</i>

Também nesta análise foi possível rejeitar a hipótese nula  $H_0$ , onde as médias dos índices de vazios dos três tipos de argamassas são estatisticamente equivalentes, a um nível de significância de 5%. Com isso, realizou-se o Teste T para verificar, par a par, quais dessas médias eram significativamente diferentes. Os resultados da análise foram apresentados na Tabela 5.20.

**Tabela 5.20 – Teste de Tukey para o índice de vazios das argamassas**

	AR	A30	AR	A50	A30	A50
Média	0,2156	0,2064	0,2179	0,2064	0,2179	0,2156
Variância	8,72E-06	9,17E-06	2,66E-05	9,17E-06	2,66E-05	8,72E-06
Observações	5	5	5	5	5	5
Correlação de Pearson	-0,4670		0,6837		0,2552	
Grau de liberdade	4		4		4	
T	<b>4,0025</b>		<b>6,7433</b>		<b>0,9700</b>	
P(T<=t) bi-caudal	0,0161		0,0025		0,3870	
t crítico bi-caudal	<b>2,7764</b>		<b>2,7764</b>		<b>2,7764</b>	
	<i>significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Assim como na absorção de água, o índice de vazios pode ter sido influenciado pela introdução da ACBC nas argamassas. Os traços A30 e A50 apresentaram médias maiores em relação à média obtida do índice de vazios da argamassa referência. Entre aqueles dois traços, não houve variação significativa dessa propriedade.

Entretanto, esse aumento de porosidade, possivelmente provocado pela incorporação da ACBC na argamassa, foi relativamente baixo. O incremento de valor foi da ordem de 5% e 6%, respectivamente para as argamassas A30 e A50, em relação à referência.

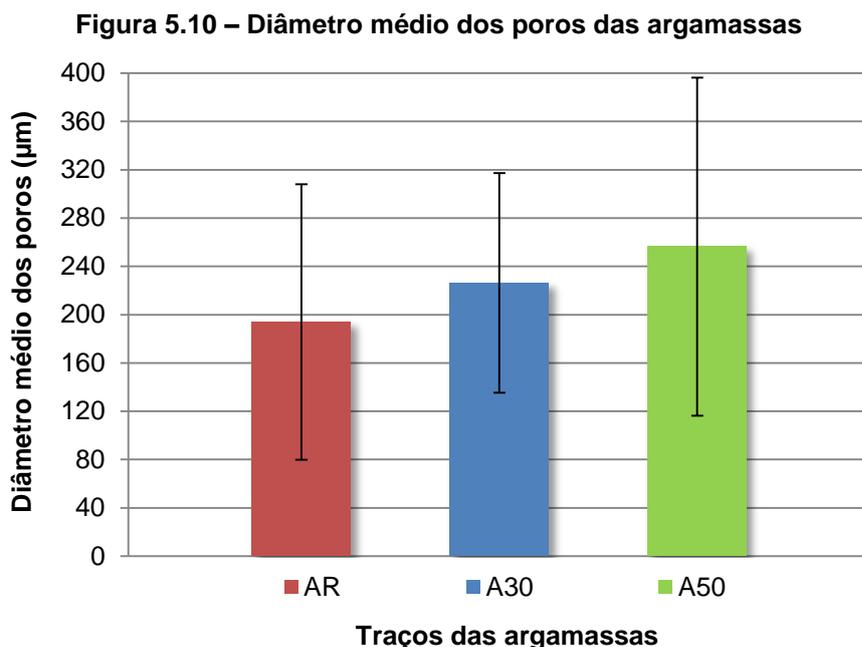
Oliveira et al. (2010) também verificaram um aumento nos valores de índice de vazios das argamassas utilizando até 30% de CBC como substituto parcial do cimento. Eles concluíram que, com maiores proporções de cinza na mistura, a argamassa tende a ser mais porosa, justificando o aumento nos valores de absorção de água e índice de vazios. Entretanto, esse aumento na porosidade pode ser controlado por meio da redução da relação água/cimento em cada um dos traços estudados.

Pela análise de microscopia óptica das argamassas, essa variação da porosidade foi verificada somente entre as médias das argamassas AR e A50. Pelo tratamento estatístico aplicado aos valores das amostras desta análise, constatou-se apenas uma diferenciação de volume de poros entre as argamassas de referência e com 50% de substituição de ACBC. Na Tabela 5.21 foram apresentados os diâmetros médios dos poros das argamassas.

**Tabela 5.21 – Diâmetro médio dos poros das argamassas**

<b>Traço</b>	<b>Diâmetro médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Desvio Padrão (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Variância (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>
AR	193,940	114,214	13.044,87
A30	226,235	91,008	8.282,43
A50	256,424	140,086	19.624,03

Na Figura 5.10 estão apresentadas as médias dos diâmetros verificados pela microscopia óptica. Nota-se que a variação dos dados em relação à média é relativamente alta, indicando a diversidade do tamanho dos diâmetros dos poros nas diferentes argamassas.



(Fonte: próprio autor)

Pela análise de variância, considerando um nível de significância  $\alpha$  de 5%, foi possível rejeitar a hipótese  $H_0$ , indicando que existem valores de médias diferentes entre si. Essa verificação pela ANOVA foi apresentada na Tabela 5.22.

**Tabela 5.22 – ANOVA para o diâmetro médio dos poros das argamassas**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	116.738,67	2	58.369,34	<b>4,4599</b>	0,0128	<b>3,0453</b>
Erro	2.395.022,6	183	13.087,56			
Total	2.511.761,3	185				<i>significativo</i>

Após a comparação dos valores de F e F crítico, com verificação de diferença significativa entre as argamassas analisadas (AR, A30 e A50), as amostras foram comparadas par a par pelo método de Tukey (T). Devido à diferença de observações entre as três argamassas, o tratamento estatístico foi feito pelo Teste T com duas amostras presumindo variâncias equivalentes – e não em par de amostras para médias, como realizado para as análises anteriores.

De fato, as análises puderam obedecer ao critério para variâncias equivalentes, conforme mostrado no teste de homoscedasticidade, indicando que a variabilidade entre os dados é similar. De acordo com Volpato & Barreto (2011), quando a relação entre duas variâncias (variância maior / variância menor) de um grupo for menor do que 4, as amostras são homoscedásticas, ou seja, as dispersões entre os dados apresentados são

homogêneos (possuem variância equivalentes). Essa análise pode ser verificada na Tabela 5.23.

**Tabela 5.23 – Teste de homoscedasticidade para o diâmetro médio dos poros**

	AR	A30	AR	A50	A30	A50
Variância	13.044,87	8.282,43	13.044,87	19.624,03	8.282,43	19.624,03
Relação VAR/var	1,58		1,50		2,37	

Como os valores das relações entre as variâncias foram menores do que 4, os dados são homoscedásticos. Apesar de uma alta variação dos dados sobre a média individual, essas dispersões são equivalentes entre as três argamassas estudadas, possibilitando, assim, a sua comparação. Com isso, realizou-se o Teste T para amostras com variâncias equivalentes, sendo a análise apresentada na Tabela 5.24.

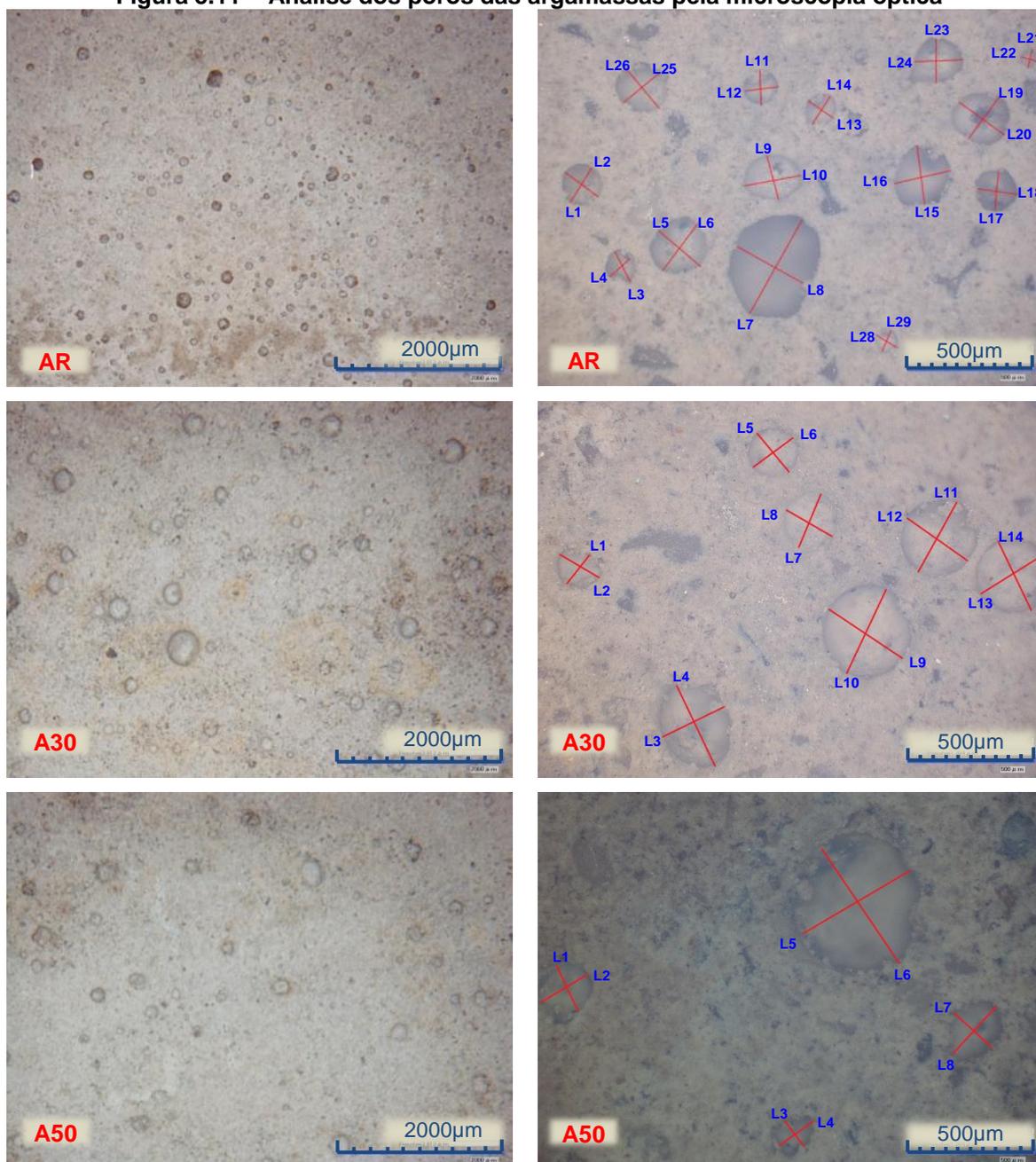
**Tabela 5.24 – Teste de Tukey para o diâmetro médio dos poros das argamassas**

	AR	A30	AR	A50	A30	A50
Média	193,94	226,23	193,94	256,42	226,23	256,42
Variância	13.044,87	8.282,43	13.044,87	19.624,03	8.282,43	19.624,03
Observações	88	56	88	42	56	42
Variância agrupada	11.200,26		15.152,26		13.126,24	
Grau de liberdade	142		128		96	
T	<b>1,7851</b>		<b>2,7066</b>		<b>1,2909</b>	
P(T<=t) bi-caudal	0,0764		0,0077		0,1998	
t crítico bi-caudal	<b>1,9768</b>		<b>1,9787</b>		<b>1,9850</b>	
	<i>não significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Portanto, pela análise do valor médio dos diâmetros dos poros das argamassas, verificou-se que existe um aumento significativo (da ordem de 30%) da média dos poros com substituição de 50% de ACBC pela areia. Além disso, considera-se que o valor médio dos diâmetros dos poros da argamassa de referência é estatisticamente equivalente ao diâmetro dos poros da argamassa com 30% de ACBC.

As imagens típicas da Figura 5.11 mostram as três argamassas (AR, A30 e A50), com diferentes ampliações. Nesta representação é possível perceber, visualmente, uma diferenciação da quantidade de poros em cada amostra. Em especial, as imagens com menor distância focal (maior ampliação) mostram as indicações das medições dos diâmetros dos poros utilizados para o cálculo das médias.

**Figura 5.11 – Análise dos poros das argamassas pela microscopia óptica**



(Fonte: próprio autor)

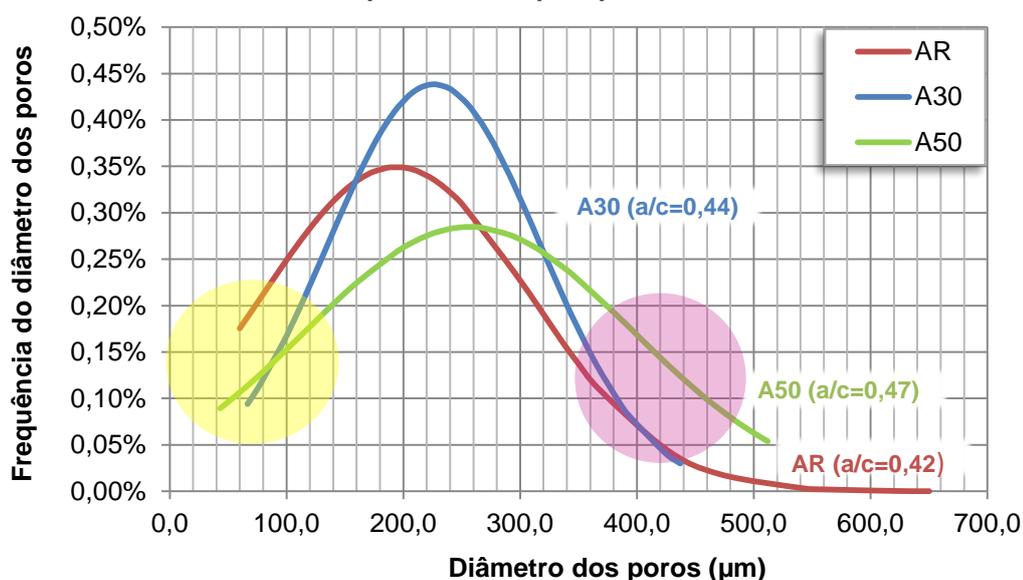
Apesar de o diâmetro médio ter aumentado em números absolutos, foi possível verificar, durante a realização da análise de microscopia óptica, que a argamassa AR apresentou maior quantidade de poros em sua superfície. À medida que a análise era feita com as argamassas A30 e A50, a quantidade de poros diminuía, porém o valor médio dos diâmetros aumentava.

Isso era visivelmente percebido durante a captura das imagens para análise. Em uma mesma distância focal, com mesmo enquadramento da argamassa no equipamento, era verificado muito mais poros na argamassa AR do que na argamassa A30 e A50. De fato,

o número de observações (medições) dos diâmetros dos poros foi maior na argamassa referência do que nas outras com ACBC (vide linha Observações, na Tabela 5.24).

Na Figura 5.12 está representada a normalidade dos dados, a qual apresenta uma similaridade entre a média e mediana. Com isso é possível verificar que as observações obtidas nesta análise são homogêneas quanto à sua distribuição.

**Figura 5.12 – Distribuição normal das medidas de diâmetro dos poros das argamassas obtidos por microscopia óptica**



(Fonte: próprio autor)

Com esta análise, é possível inferir dois possíveis motivos para o aumento do diâmetro médio dos poros das argamassas com ACBC. Cada um deles está indicado com um sombreamento no gráfico apresentado na Figura 5.12 (regiões destacadas em amarelo e lilás) cuja discussão está a seguir.

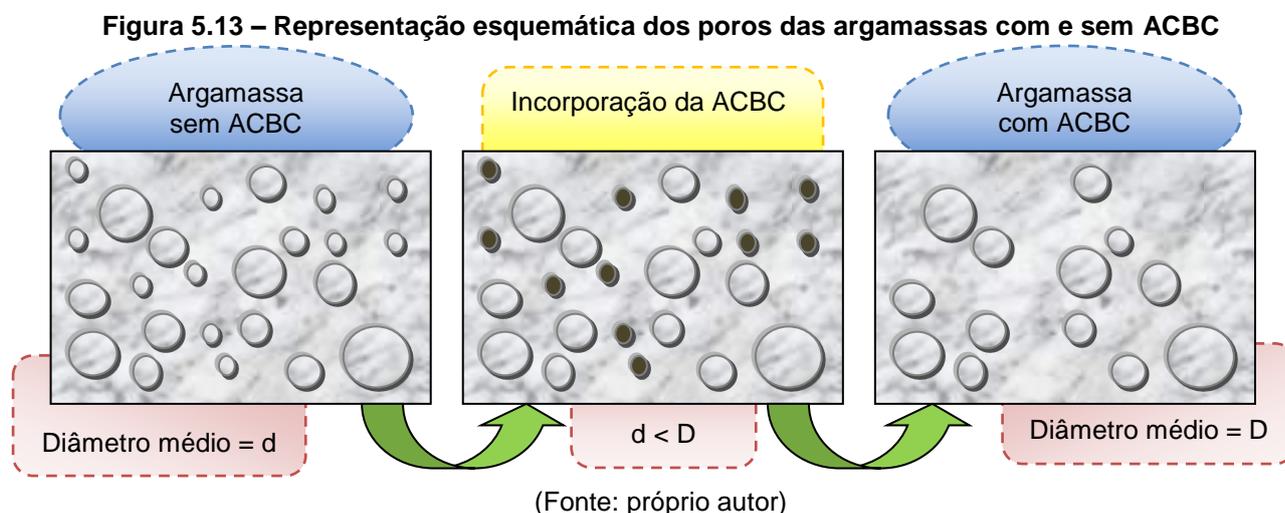
Na região destacada em amarelo se verifica uma quantidade menor de poros pequenos nas argamassas com ACBC (a frequência de observações de diâmetros abaixo de 100 µm é maior na argamassa referência). A areia de cinza pode ter preenchido esses poros menores devido a sua menor granulometria, comparada à areia natural. Desta forma, o cálculo do valor médio dos diâmetros dos poros das argamassas com ACBC apresentou valores maiores para estas amostras.

Somado a isto, a região hachurada em lilás indica uma quantidade maior de observações de poros com diâmetros acima de 360 µm para a argamassa com 50% de ACBC. Este aumento da porosidade nesta argamassa pode estar ligado ao aumento da relação água/cimento, necessária para a moldagem dos corpos de prova, como verificado

por Oliveira et al. (2010). Salienta-se que o aumento da incorporação da ACBC levou à necessidade de um incremento respectivo na quantidade de água na mistura para garantir a mesma consistência. A quantidade de água adicional, que foi absorvida pela ACBC para manutenção do valor da consistência durante a moldagem, pode ter levado ao incremento da porosidade durante o período de cura das argamassas. Este fenômeno pode ter contribuído para o aumento do valor médio dos diâmetros dos poros das argamassas com ACBC, principalmente quando comparadas às misturas AR e A50.

Além de uma possível interferência da relação a/c, essa variação na quantidade de poros em cada argamassa é ratificada pela incorporação da ACBC (material mais fino) nos poros menores. O valor médio dos diâmetros dos poros aumenta (em números absolutos, comparando AR e A50), mas a quantidade deles diminui. A ACBC pode estar preenchendo os pequenos poros, diminuindo a sua quantidade, restando no cálculo do valor médio dos diâmetros dos poros da argamassa A50, somente aqueles poros maiores que não foram preenchidos pela ACBC.

Essa disposição da ACBC e preenchimento dos poros da argamassa podem ser melhores compreendidos pela representação esquemática apresentada na Figura 5.13.



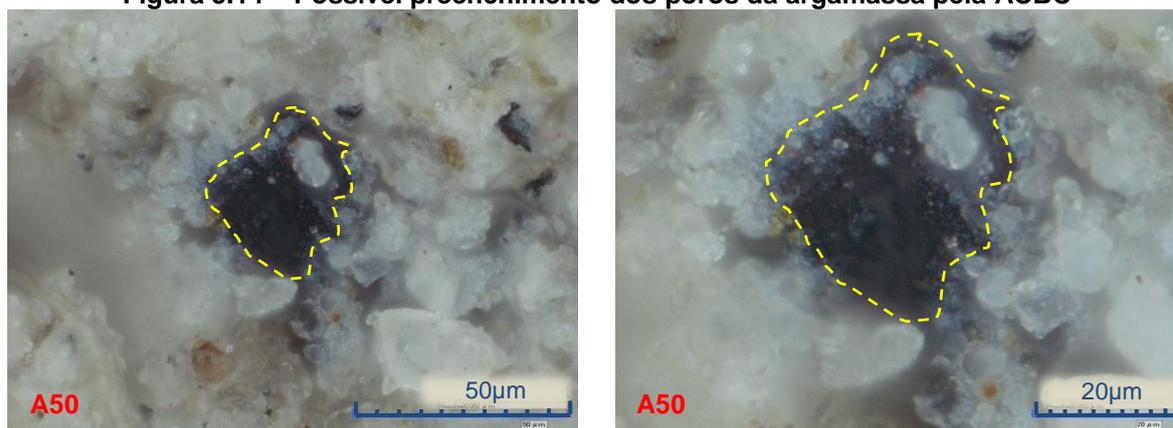
Desta forma, o valor médio dos diâmetros dos poros da argamassa A50 apresenta valores relativamente maiores que o verificado na argamassa de referência. Além disso, a quantidade desses poros aumentará em função do incremento da relação a/c necessária para envolver a superfície específica da ACBC que ultrapassar o teor de 30% de substituição.

Deste modo, conclui-se que o valor de substituição de 30% de ACBC é suficiente para o preenchimento dos poros de menor dimensão. A partir desse valor a incorporação de

mais ACBC demandará um incremento de a/c e consequente formação de poros de diâmetros maiores (região lilás da Figura 5.12).

Na Figura 5.14 foram apresentadas duas imagens da argamassa A50 obtida pelo microscópio óptico. Em especial, as imagens apresentam uma partícula de ACBC, da ordem de 40  $\mu\text{m}$  de diâmetro, cuja partícula está incorporada à matriz da argamassa.

**Figura 5.14 – Possível preenchimento dos poros da argamassa pela ACBC**



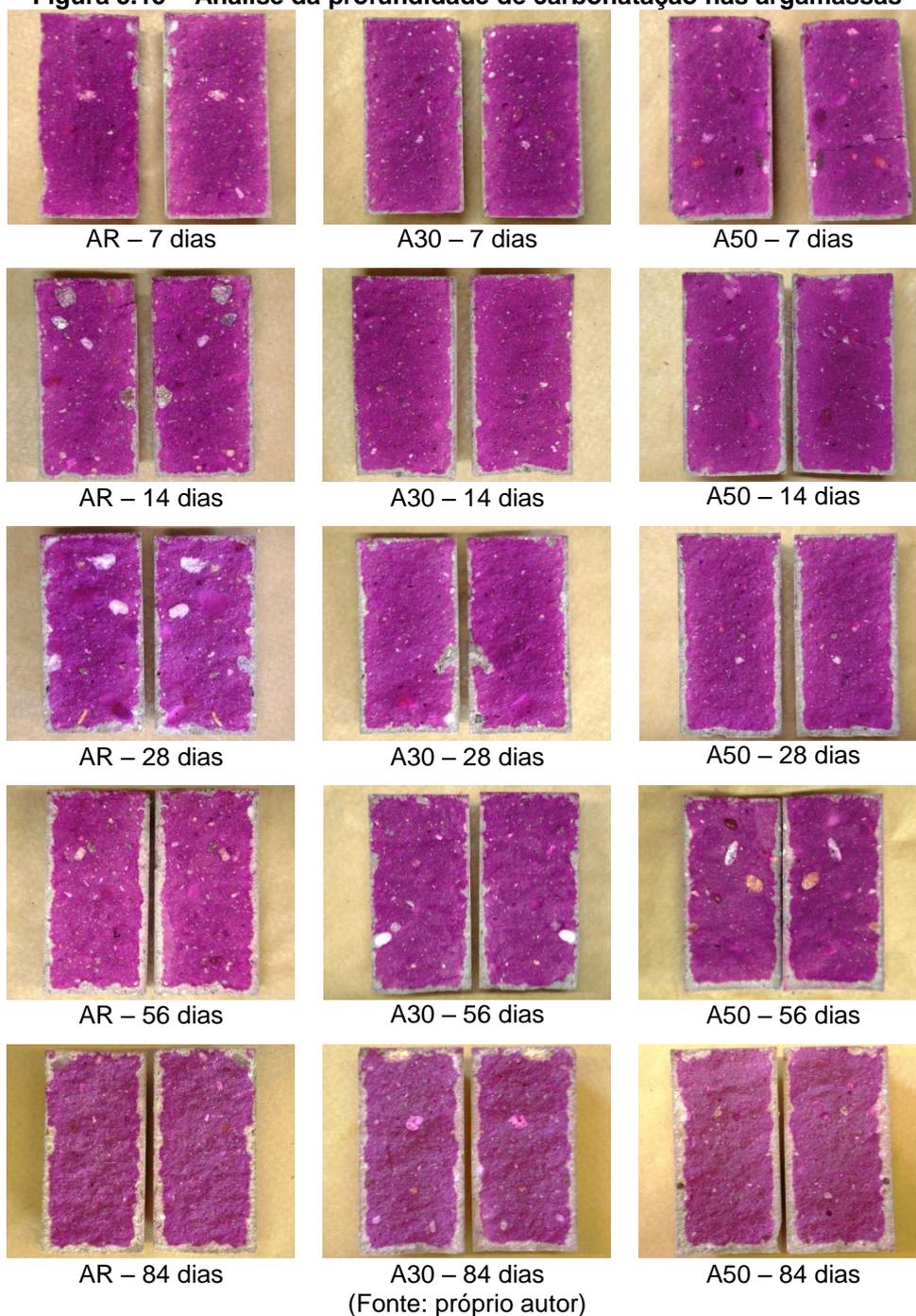
(Fonte: próprio autor)

Com esta imagem apresentada, foi possível verificar que a incorporação da ACBC como agregado miúdo pode ter levado ao preenchimento dos poros menores da argamassa devido a sua menor granulometria, comparada a da areia natural.

Em estudos desenvolvidos por Cordeiro et al. (2008) foi possível concluir que existe uma relação direta entre a resistência à compressão das argamassas contendo CBC e a finura da cinza. Quanto maior a finura da CBC, melhor a capacidade de empacotamento das partículas, levando a maiores valores de resistência à compressão. Deste modo, o efeito provocado pela incorporação da ACBC pode ser devido ao efeito físico de maior compactação da argamassa, uma vez que a granulometria das amostras de ACBC é menor do que as da areia natural.

#### **5.4 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NAS ARGAMASSAS**

A profundidade de carbonatação foi verificada pelo ensaio acelerado, considerando um teor de  $15\% \pm 5\%$  de  $\text{CO}_2$  e umidade relativa do ar interno à câmara variando entre 50% e 85%. A evolução da profundidade de carbonatação (frente incolor) pode ser verificada na Figura 5.15, para as idades de 7, 14, 28, 56 e 84 dias, de cada traço de argamassa.

**Figura 5.15 – Análise da profundidade de carbonatação nas argamassas**

Os valores das médias das profundidades de carbonatação (em mm) foram apresentados na Tabela 5.25, bem como o coeficiente de variação verificado no conjunto de cada medida.

Tabela 5.25 – Profundidade de carbonatação nas argamassas

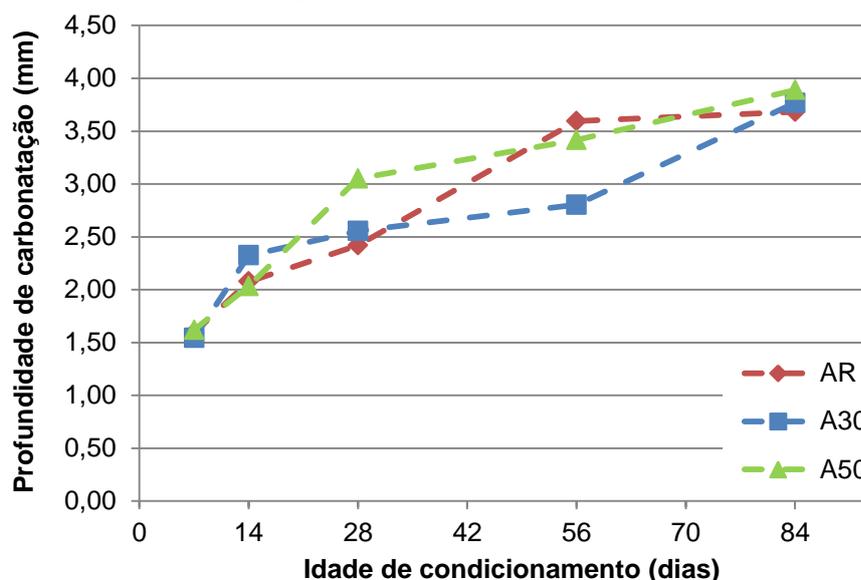
Data (dias)	AR		A30		A50	
	PC <sup>(1)</sup> (mm)	CV <sup>(2)</sup>	PC <sup>(1)</sup> (mm)	CV <sup>(2)</sup>	PC <sup>(1)</sup> (mm)	CV <sup>(2)</sup>
7	1,59	21%	1,54	19%	1,62	14%
14	2,08	13%	2,33	6%	2,03	14%
28	2,42	13%	2,56	20%	3,05	11%
56	3,60	21%	2,80	22%	3,42	22%
84	3,68	18%	3,77	14%	3,89	19%

<sup>(1)</sup> PC – profundidade de carbonatação

<sup>(2)</sup> CV – coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média)

A tendência de evolução da frente de carbonatação pela idade de condicionamento, em cada traço de argamassa, foi apresentada na Figura 5.16.

Figura 5.16 – Tendência de evolução das profundidades de carbonatação nas argamassas



(Fonte: próprio autor)

A análise de variância foi realizada para cada grupo de médias nas diferentes idades. Considerando um nível de significância  $\alpha$  de 5%, foi possível verificar quais médias eram significativamente diferentes entre si. Essa avaliação foi por meio do Teste de Tukey para duas amostras presumindo variâncias equivalentes, cujo resumo com os resultados foi apresentado na Tabela 5.26.

**Tabela 5.26 – Resultados do Teste de T para as médias das profundidades de carbonatação**

Idade (dias)	AR	A30	AR	A50	A30	A50
7	<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>	
14	<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>		<i>significativo</i>	
28	<i>não significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>significativo</i>	
56	<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>		<i>significativo</i>	
84	<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Pelos resultados obtidos, na maioria das observações é possível verificar um comportamento muito próximo entre as argamassas AR e A50. Pela análise individual de mesma idade, as amostras com 30% de ACBC apresentaram uma variação maior entre as demais argamassas, porém, de modo geral, elas sugerem uma taxa de crescimento ligeiramente inferior às amostras CR e C50. Entretanto, não é possível concluir com precisão se a incorporação da ACBC, em diferentes teores, provoca alguma influência significativa na profundidade de carbonatação das argamassas, visto que a evolução desta frente se mostrou, em geral, muito semelhante em todas as amostras analisadas.

Kulakowski (2002) verificou a influência da sílica ativa na carbonatação de argamassas, utilizando diferentes teores de relação a/c, em ensaio acelerado com 5% de concentração de CO<sub>2</sub>. O estudo revelou que, para relações a/c inferiores a 0,50, a adição de sílica ativa praticamente não contribuiu para a profundidade de carbonatação, verificando-se, ainda, um pequeno aumento desta frente devido à diminuição do pH da mistura. Todos os valores da profundidade de carbonatação dessas argamassas foram inferiores a 5 mm. Apenas para relações a/c acima de 0,70 é que se verificou uma pequena vantagem da adição da sílica nas argamassas, devido ao melhoramento das condições de porosidade proporcionados pela adição. Com isso, a autora concluiu que, nitidamente, a carbonatação é regida pela relação água/aglomerante, e o comportamento da adição na mistura de argamassa é praticamente secundário.

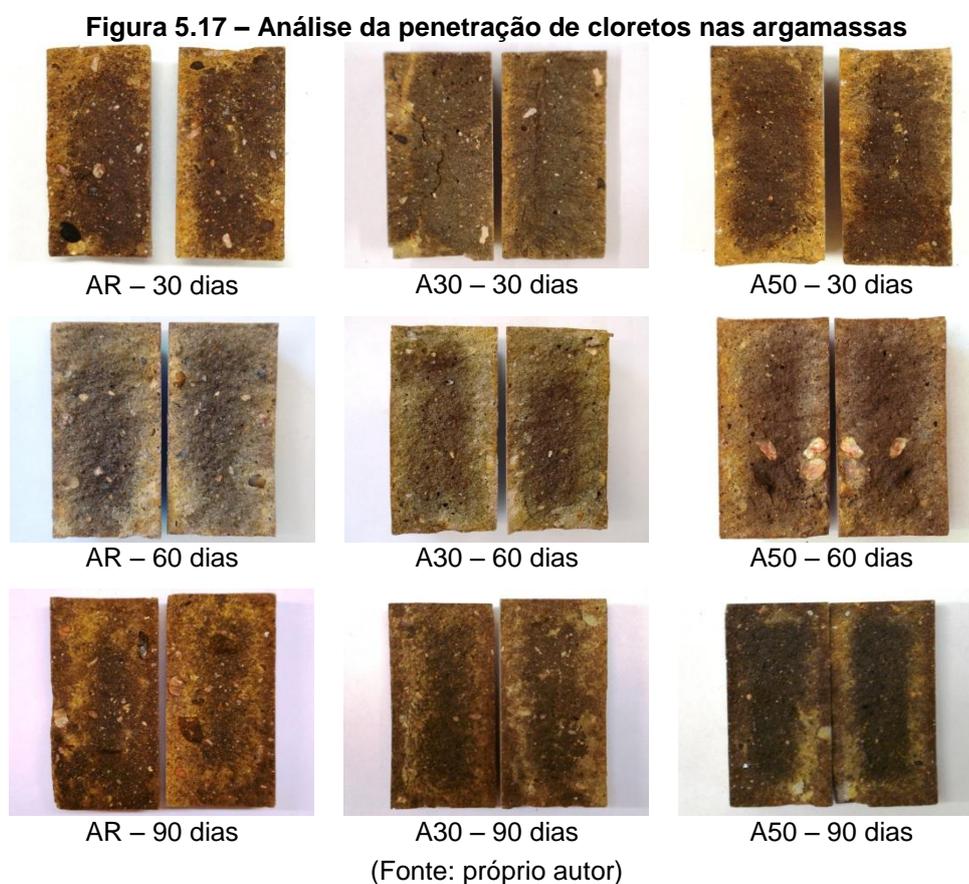
A autora ainda constatou que a espessura da frente de carbonatação em argamassas é inferior à verificada em concretos. Em investigação com corpos de prova de concretos utilizando ACBC como agregado miúdo, Sarmiento e Vanderlei (2011) concluíram que o uso deste resíduo não provocou influência negativa na carbonatação para teores de até 30% de substituição. Para estes teores, os valores da profundidade de carbonatação ficaram abaixo de 4 mm, para 56 dias de condicionamento a 5% de CO<sub>2</sub>.

Deste modo, é possível que as argamassas AR, A30 e A50 tenham apresentado, entre elas, um comportamento semelhante em relação à profundidade de carbonatação, visto que as relações a/c utilizadas para a moldagem foram inferiores a 0,50, tal como nos estudos apresentados neste item por Kulakowski (2002) e Sarmiento e Vanderlei (2011).

## 5.5 PENETRAÇÃO DE CLORETOS NAS ARGAMASSAS

A penetração de cloretos nas argamassas foi avaliada pelo tratamento das superfícies secas aspergidas com solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) e fluoresceína. A região em que se verificou a formação de uma região esbranquiçada (mais clara) indicou a presença de cloretos livres.

Na Figura 5.17, foi possível observar as imagens obtidas após a aspersão das soluções em cada corpo de prova. As idades de análise foram depois de 30, 60 e 90 dias de imersão em solução salina de NaCl.



Com auxílio de um paquímetro digital, foi verificada a profundidade da penetração de cloretos pela medida da espessura da região esbranquiçada das amostras. As médias dos valores obtidos foram apresentadas na Tabela 5.27.

Tabela 5.27 – Profundidade de penetração de cloretos nas argamassas

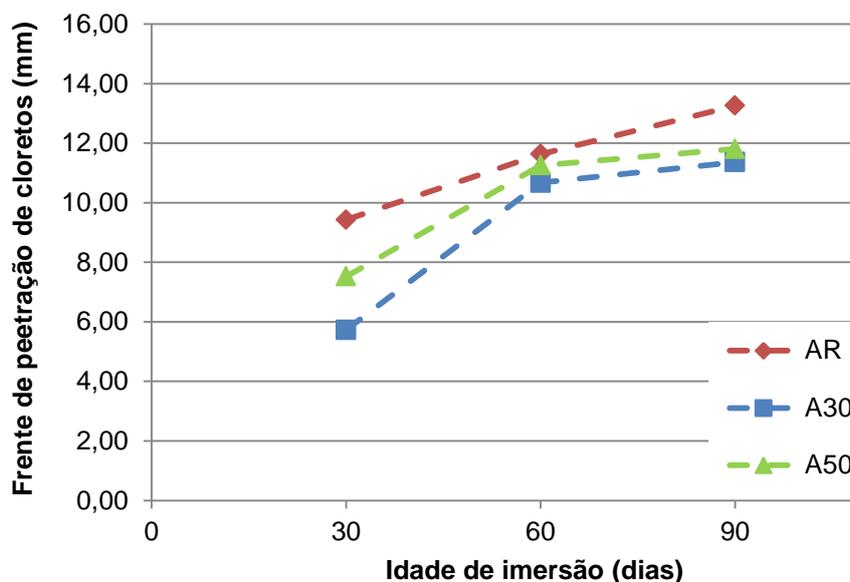
Data (dias)	AR		A30		A50	
	PPC <sup>(1)</sup> (mm)	CV <sup>(2)</sup>	PPC <sup>(1)</sup> (mm)	CV <sup>(2)</sup>	PPC <sup>(1)</sup> (mm)	CV <sup>(2)</sup>
30	9,43	11%	5,73	13%	7,53	9%
60	11,63	21%	10,67	13%	11,25	10%
90	13,26	9%	11,36	7%	11,80	8%

<sup>(1)</sup> PPC – profundidade de penetração de cloretos

<sup>(2)</sup> CV – coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média)

A partir desses valores, foi possível elaborar um gráfico para visualizar a tendência de evolução de penetração dos íons cloretos nas diferentes idades de ensaio. Esta análise pode ser verificada na Figura 5.18.

Figura 5.18 – Tendência de evolução da penetração de cloretos nas argamassas



(Fonte: próprio autor)

Para avaliar a significância dos resultados, em um nível  $\alpha$  de 5%, as médias obtidas no ensaio, nas diferentes idades, foram verificadas pelo Teste de Tukey. Os resultados desta análise foram apresentados na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 – Resultados do Teste de Tukey para as médias das frentes de penetração de cloretos nas argamassas

Idade (dias)	AR	A30	AR	A50	A30	A50
30	<i>significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>significativo</i>	
60	<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>	
90	<i>significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Apesar das argamassas A30 e A50 apresentarem uma diferença significativa no valor da profundidade de penetração de cloretos no primeiro mês de condicionamento, elas apresentaram uma tendência de permanecerem com um comportamento semelhante frente a este fenômeno. Além disso, a argamassa referência apresentou as maiores médias de espessura de penetração dos íons cloretos em todas as idades.

Desta forma, devido à diminuição da frente verificada, é possível inferir que a incorporação da ACBC pode provocar um aumento na resistência à penetração de cloretos em argamassas, as quais utilizam esse resíduo como substituto parcial da areia natural. Esta verificação também pôde ser conferida para os corpos de prova de concretos, em ensaio acelerado, exposto no item 5.11.

Em pesquisa utilizando diversos tipos de cinza como substituto do cimento Portland em argamassas, Chindaprasirt et al. (2008) verificaram que a adição das cinzas aumentaram a resistência à penetração do cloreto. O estudo utilizou a cinza da casca do arroz, a cinza volante e a cinza de palmeira, em adições de 20% e 40%. Após 30 dias de imersão em solução de NaCl 3%, as argamassas de referência apresentaram uma frente de penetração de cloretos de 16 mm, enquanto que as demais misturas apresentaram valores entre 4 e 10 mm. Este aumento de desempenho com as adições foi atribuído ao efeito pozolânico das cinzas, devido ao aumento dos locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação, reduzindo o  $\text{Ca(OH)}_2$  e melhorando a permeabilidade das argamassas.

Este efeito de precipitação pode ter ocorrido pelas reações entre as espécies químicas presentes na ACBC (Tabela 5.1) e o NaCl. No caso das amostras A30 e A50 a frente de penetração foi reduzida, pois, durante a imersão das mesmas na solução salina, houve uma precipitação de compostos, entre eles o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Além disso, pode ter ocorrido também a precipitação devido à reação do NaCl com o  $\text{Pb}^{2+}$ , o qual está presente na ACBC conforme constatado por Sales e Lima (2010).

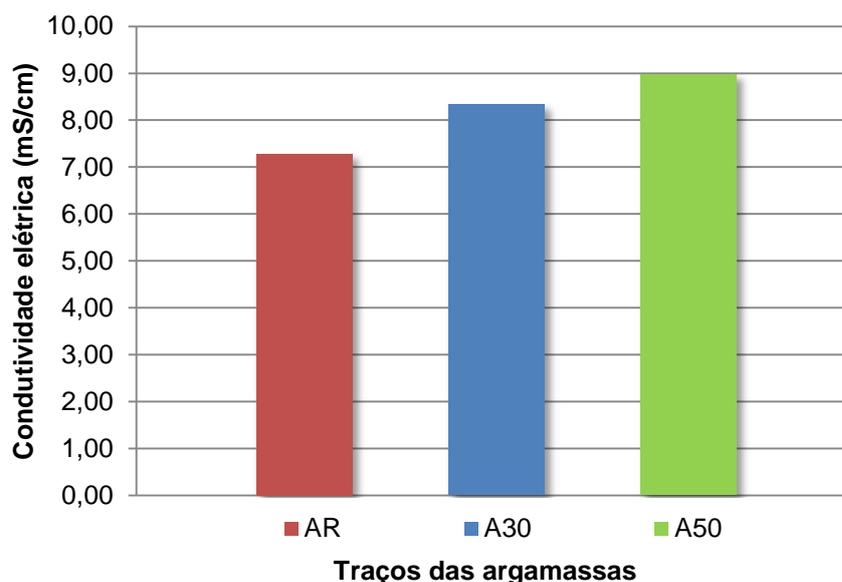
## **5.6 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO AQUOSA DA ARGAMASSA**

A condutividade elétrica da solução aquosa dos poros da argamassa foi verificada, a partir do preparo de solução aquosa 1:1 (em massa) das argamassas moídas, com 28 dias de idade. Os resultados foram apresentados na Tabela 5.29.

**Tabela 5.29 – Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros das argamassas**

Traço	Condutividade elétrica (mS/cm)
AR	7,28
A30	8,33
A50	8,97

Esses resultados podem ser analisados também pela Figura 5.19.

**Figura 5.19 – Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros das argamassas**

(Fonte: próprio autor)

Verifica-se que houve um incremento da condutividade elétrica em 14% e 23%, respectivamente para as argamassas A30 e A50 em relação à referência.

Cezar (2011) mostrou que o uso da cinza da casca do arroz como substituto parcial do aglomerante provocou uma diminuição da condutividade elétrica comparada a uma mistura referência. Além disso, a condutividade elétrica da solução decresce com o avanço da idade e com o aumento da relação água/cimento devido à maior diluição dos íons na mistura. Aos 28 dias, e relação a/c de 0,45, a solução dos poros das pastas analisadas pela autora foram 9,51 mS/cm (para a pasta referência), 6,99 mS/cm (para 15% de adição da cinza da casca de arroz moída) e 8,30 mS/cm (para 15% de adição da cinza da casa de arroz natural).

Em estudos desenvolvidos por Rosa (2005), a substituição parcial do cimento por escória de alto forno, em teores de 50% e 70%, também resultou na diminuição dos valores de condutividade elétrica em relação ao traço referência. Em outra análise, contudo,

utilizando 50% de escória ativada quimicamente, foi verificado um acréscimo significativo nos valores dessa propriedade. Este fato foi atribuído ao aumento do pH que a escória quimicamente ativada provocou nos concretos.

O aumento de pH indica uma maior concentração dos íons  $\text{OH}^-$ , os quais são os mais condutivos entre os frequentemente encontrados na solução dos poros. Em geral, a presença dos íons  $\text{OH}^-$  é atribuída à quantia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de cálcio) proveniente da hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  do cimento (HEWLETT, 2003).

No caso de adições minerais substituindo parte do aglomerante, ocorre o consumo parcial do CH (hidróxido de cálcio) para formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), diminuindo, assim, a concentração do  $\text{OH}^-$  (íon hidroxila). Isso faz com que a condutividade elétrica seja reduzida em concretos contendo adições minerais, quando comparados a concretos convencionais (CEZAR, 2011).

De acordo com a análise do extrato solubilizado verificado por Bessa (2011), o pH do concreto utilizando a ACBC como agregado miúdo foi maior do que o concreto referência. Os valores de pH apresentados foram de 12,33 e 11,93, respectivamente para o concreto com e sem ACBC.

Deste modo, é possível atribuir o aumento dos valores da condutividade elétrica das argamassas analisadas ao aumento de pH verificado na matriz cimentícia com incorporação da ACBC. Esse aumento de pH pode indicar um acréscimo na concentração de íons  $\text{OH}^-$  presente na mistura, elevando, assim, os valores de condutividade elétrica nas argamassas com ACBC.

## 5.7 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS CONCRETOS

Para caracterização da resistência mecânica, os concretos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.

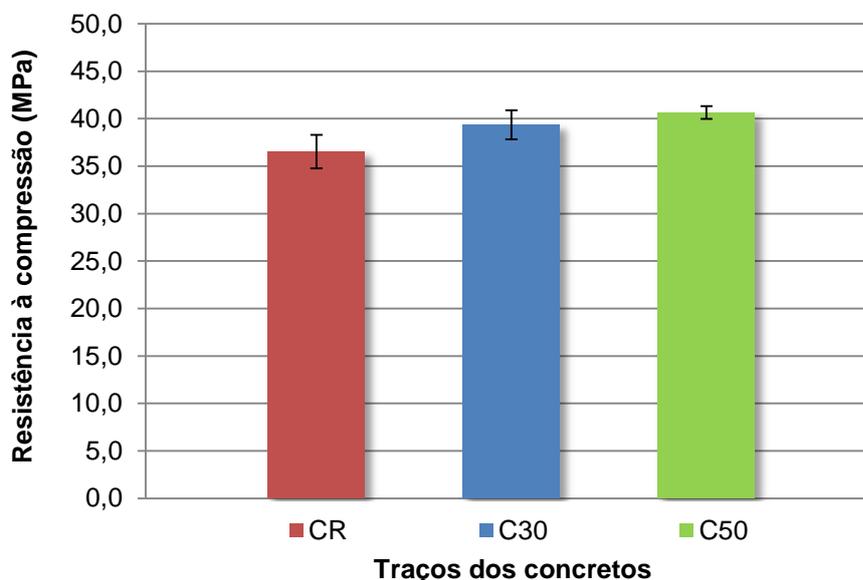
Os resultados da resistência à compressão simples dos concretos, aos 28 dias, foram apresentados na Tabela 5.30.

**Tabela 5.30 – Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias**

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
CR	36,5	1,8	5%
C30	39,4	1,5	4%
C50	40,6	0,7	2%

Pelos dados apresentados, foi possível mostrar os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos concretos na forma gráfica, como verificado na Figura 5.20.

**Figura 5.20 – Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias**



(Fonte: próprio autor)

Pela análise dos resultados, pode-se perceber que o uso da ACBC levou a um aumento de resistência à compressão na ordem de 8% e 11%, para os concretos com 30% e 50% de substituição da areia natural.

Para se verificar a consistência deste aumento de resistência, os resultados foram analisados pelo teste ANOVA, com nível de significância  $\alpha$  de 5% (Tabela 5.31).

**Tabela 5.31 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	35,2931	2	17,6465	<b>8,9743</b>	0,0072	<b>4,2565</b>
Erro	17,6971	9	1,9663			
Total	52,9902	11				<i>significativo</i>

Como a F de Snedecor foi superior à F crítica, pode-se afirmar que a relação obtida é válida estatisticamente, indicando que existe diferença significativa entre as médias analisadas, a partir da rejeição da hipótese nula  $H_0$ .

Para se verificar quais as médias são significativamente diferentes, realizou-se o Teste T com o mesmo nível de significância de 5%. (Tabela 5.32).

**Tabela 5.32 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias**

	CR	C30	CR	C50	C30	C50
Média	36,54	39,36	36,54	40,64	39,36	40,64
Variância	3,1158	2,3321	3,1158	0,4511	2,3321	0,4511
Observações	4	4	4	4	4	4
Correlação de Pearson	0,60239		-0,95653		-0,46108	
Grau de liberdade	3		3		3	
T	<b>3,8027</b>		<b>3,3999</b>		<b>1,3319</b>	
P(T<=t) bi-caudal	0,0160		0,0212		0,1375	
t crítico bi-caudal	<b>3,1824</b>		<b>3,1824</b>		<b>3,1824</b>	
	<i>significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Em análise do Teste de Tukey, foram verificados que os valores de T foram superiores aos valores de t crítico entre a comparação das amostras CR/C30 e CR/C50, indicando variações significativas das médias. Deste modo, com 95% de confiabilidade, é possível afirmar que a incorporação da ACBC provocou um aumento significativo na resistência à compressão dos concretos.

Sarmento & Vanderlei (2011) verificou que, ao substituir 20% da areia natural pela ACBC, a resistência à compressão do concreto aos 28 dias foi aumentada em 7% em relação ao concreto convencional.

O aumento de resistência para concretos com ACBC aos 28 dias pode ser atribuído ao efeito *filler* de preenchimento dos poros proporcionados pela pequena pozolanicidade potencial da ACBC. Esta constatação também foi verificada por Martins e Machado (2009). De fato, considerando que no ensaio de Chapelle modificado houve um consumo de 48 mg de CaO por grama de ACBC, mas que este valor foi obtido a partir de uma amostra de ACBC com 80,8% de SiO<sub>2</sub> (Tabela 5.1), a pozolanicidade da cinza contida na ACBC pode ter contribuído, ainda que pouco, para um aumento de resistência nas primeiras idades (BESSA, 2011). Outros pesquisadores que já trabalharam com a cinza pura de cana-de-açúcar (CBC) chegaram a resultados de aumento de resistência comprovados pela atividade pozolânica da cinza (FREITAS, 1996; HERNÁNDEZ, 1998; CORDEIRO, 2005; SOUZA et al., 2007; GANEZAN et al., 2007; CORDEIRO et al., 2008; CORDEIRO et al., 2009).

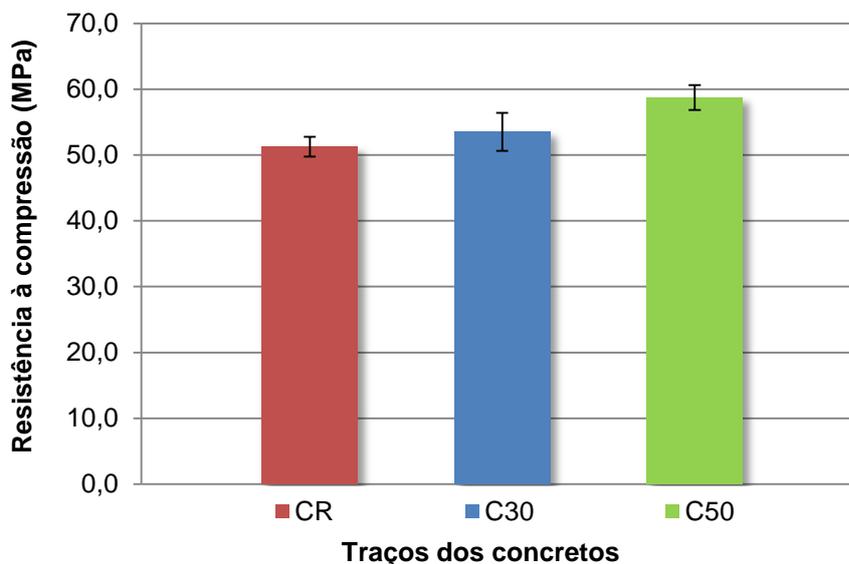
Além disso, foi verificada a resistência à compressão dos concretos ao final do ensaio de potencial de corrosão, os quais foram submetidos às mesmas condições que as amostras de concreto armado. Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ciclos semanais de secagem e imersão em solução salina de NaCl. O ensaio foi encerrado após

24 semanas de tratamento, totalizando 168 dias de idade dos concretos. Os resultados da resistência à compressão dos concretos aos 168 dias foram apresentados na Tabela 5.33.

<b>Traço</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
CR	51,3	1,5	3%
C30	53,5	2,9	6%
C50	58,7	1,9	3%

O gráfico com a média dos resultados de resistência à compressão aos 168 dias foi apresentado na Figura 5.21.

**Figura 5.21 – Resistência à compressão dos concretos aos 168 dias**



(Fonte: próprio autor)

Nas idades mais avançadas, também se verificou um incremento de resistência à compressão simples com a aplicação da ACBC. O aumento de resistência, aos 168 dias de idade, foi de 4% e 14%, respectivamente para o C30 e C50, em relação ao concreto referência.

O teste ANOVA foi aplicado nos dados para se verificar a significância dos resultados, em um nível  $\alpha$  de 5%. A análise foi apresentada na Tabela 5.34.

**Tabela 5.34 – ANOVA para a resistência à compressão dos concretos aos 168 dias**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	88,4659	2	44,2329	<b>8,9918</b>	0,0157	<b>5,1433</b>
Erro	29,5156	6	4,9193			
Total	117,9815	8				<i>significativo</i>

Pela comparação dos valores de F e F crítico, tem-se que é possível ignorar a hipótese  $H_0$ , mostrando que há resultados com diferença significativa de resistência à compressão. Para se determinarem quais médias apresentam variações significativas em relação às outras, foi realizado o teste complementar de Tukey, com análise dos pares de médias das amostras. Essa verificação foi apresentada na Tabela 5.35.

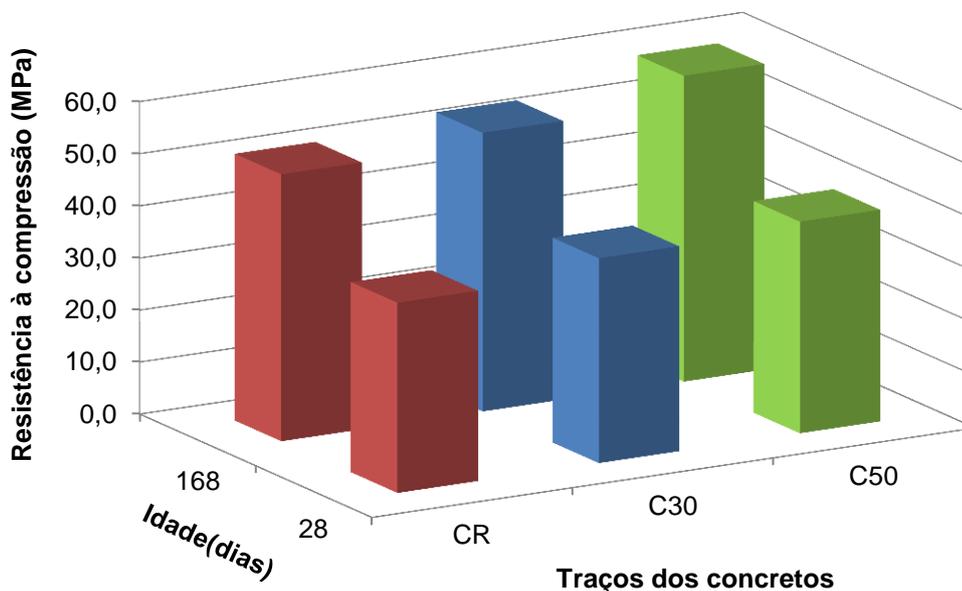
**Tabela 5.35 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 168 dias**

	CR	C30	CR	C50	C30	C50
Média	51,26	53,51	51,26	58,74	53,51	58,74
Variância	2,3306	8,6280	2,3306	3,7992	8,6280	3,7992
Observações	3	3	3	3	3	3
Correlação de Pearson	0,6058		-1,0000		-0,6076	
Grau de liberdade	2		2		2	
T	<b>1,6586</b>		<b>3,7295</b>		<b>2,0587</b>	
P(T<=t) bi-caudal	0,2391		0,0650		0,1757	
t crítico bi-caudal	<b>4,3027</b>		<b>4,3027</b>		<b>4,3027</b>	
	<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>		<i>não significativo</i>	

Por meio do Teste T, não foi possível determinar quais as médias de resistência apresentaram variações significativas.

Foi elaborado um gráfico (Figura 5.22) para visualização das resistências à compressão simples nas diferentes idades de ensaio (28 e 168 dias), comparando os valores de cada traço de concreto (CR, C30 e C50). Nesta imagem foi possível verificar o acréscimo de resistência dos concretos com ACBC sobre o concreto convencional nas duas idades de ensaio.

**Figura 5.22 – Resistência à compressão dos concretos aos 28 e 168 dias**



(Fonte: próprio autor)

Em média, houve um aumento de 40% nas resistências dos concretos entre as diferentes idades verificadas. O maior incremento na resistência foi de 45% sobre o concreto com 50% de ACBC.

Além da idade de hidratação da matriz cimentícia do concreto, o aumento da resistência à compressão nas diferentes idades também pode ser atribuído à submissão dos corpos de prova aos ciclos de envelhecimento com imersão em solução salina de NaCl. A penetração e acúmulo do sal na microestrutura dos poros pode ter levado a um aumento de compacidade dos concretos. Isso pôde ser percebido pelo aumento de massa nos corpos de prova de concreto, a partir do monitoramento semanal das amostras no ensaio de potencial de corrosão (item 5.9).

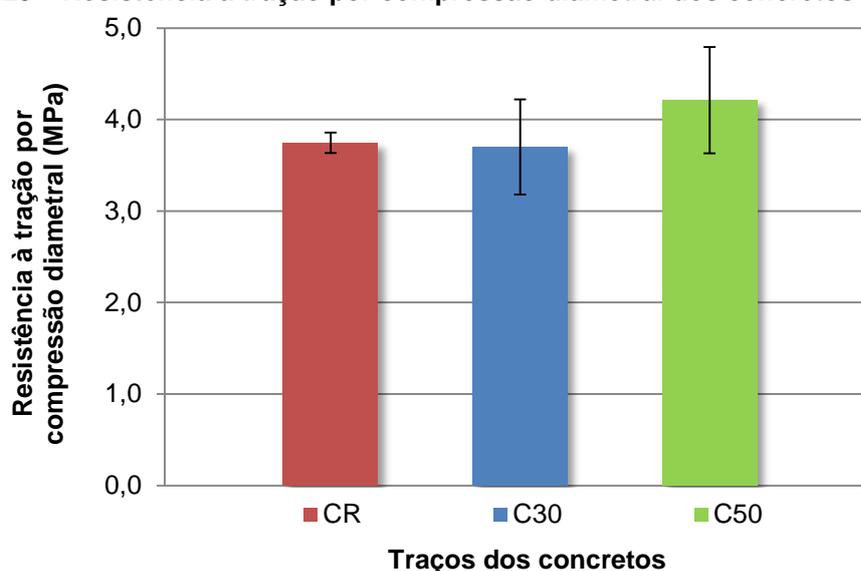
Os resultados obtidos indicaram que nas primeiras idades houve um aumento da resistência à compressão com o incremento da substituição da ACBC. Todavia, considerando idades mais avançadas, os valores de resistência à compressão do concreto referência são estatisticamente equivalentes com os valores obtidos para os concretos com teores de 30% e 50% de incorporação da ACBC.

Além da resistência à compressão simples, foi realizado também o ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos, aos 28 dias, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.36.

**Tabela 5.36 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias**

Traço	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
CR	3,8	0,1	3%
C30	3,7	0,5	14%
C50	4,2	0,6	14%

O histograma com os valores das resistências à tração por compressão diametral dos concretos foi apresentado na Figura 5.23.

**Figura 5.23 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias**

(Fonte: próprio autor)

Os valores obtidos nesta análise indicam uma relação média de 10% sobre os valores de resistência à compressão aos 28 dias, para todos os concretos (CR, C30 e C50).

Em verificação da significância dessa variação, foi realizado o teste ANOVA, com nível  $\alpha$  de 5%. A análise foi apresentada na Tabela 5.37.

**Tabela 5.37 – ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral dos concretos**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	0,3195	2	0,1597	<b>0,7780</b>	0,5343	<b>9,5521</b>
Erro	0,6159	3	0,2053			
Total	0,9354	5				<i>não significativo</i>

Pela comparação entre os valores de  $F$  e  $F$  crítico, onde o primeiro é inferior ao segundo, tem-se que não é possível rejeitar a hipótese  $H_0$ . Desta forma, a diferença entre os resultados do ensaio de tração por compressão diametral não é significativa, levando a afirmar que a incorporação da ACBC no concreto pode não ter provocado influência nesta propriedade em estudo.

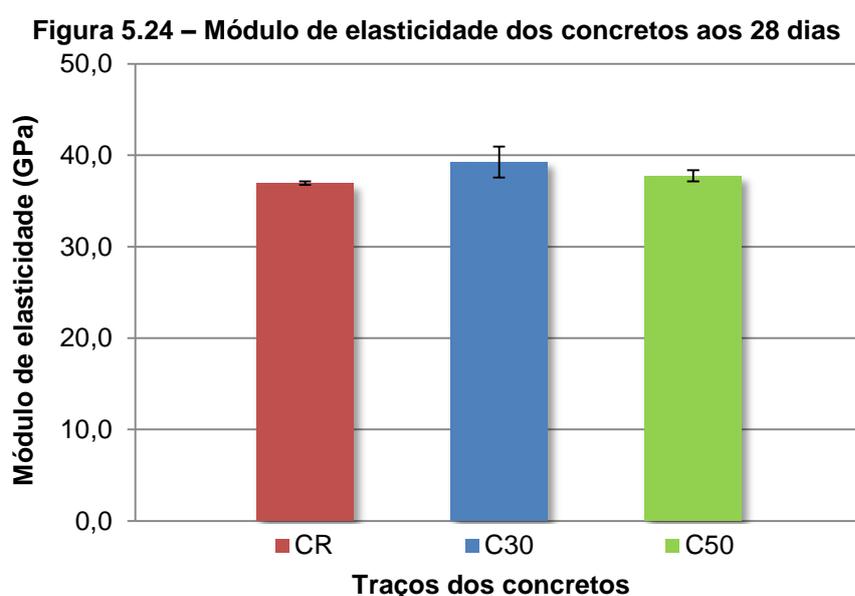
No teste da resistência à tração por compressão diametral verificado por Bessa (2011), os concretos com traço utilizando cimento CP II E 32, com e sem ACBC, apresentaram valores entre 2,9 e 3,4 MPa, indicando uma relação entre 10% e 15% sobre a resistência à compressão dos concretos.

Em análise similar, verificaram-se os dados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dos concretos, cujos resultados foram apresentados na Tabela 5.38. O ensaio considerou o módulo secante a 30% da carga de ruptura dos concretos, aos 28 dias.

**Tabela 5.38 – Módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias**

Traço	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
CR	37,0	0,2	1%
C30	39,3	1,7	4%
C50	37,8	0,6	2%

A representação gráfica dos valores de módulo de elasticidade dos concretos pode ser verificada na Figura 5.24.



(Fonte: próprio autor)

Como forma de verificação da consistência dos resultados, foi aplicado o teste de variância ANOVA, com nível  $\alpha$  de 5% de significância, sendo que a análise foi apresentada na Tabela 5.39.

**Tabela 5.39 – ANOVA para o módulo de elasticidade dos concretos**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	5,4781	2	2,7390	<b>2,3763</b>	0,2407	<b>9,5521</b>
Erro	3,4579	3	1,1526			
Total	8,9360	5				<i>não significativo</i>

Novamente, como o valor de F foi inferior ao valor de F crítico, não foi possível rejeitar a hipótese nula  $H_0$ . Logo, os resultados do ensaio de módulo de elasticidade não apresentaram diferença significativa entre os concretos com e sem ACBC.

Os resultados apresentados por Bessa (2011) também foram similares aos obtidos no ensaio de módulo de elasticidade. Para os concretos utilizando cimento CP II E 32, foram alcançados valores de módulo de elasticidade de 38,0 GPa, 39,8 GPa e 39,5 GPa, respectivamente para o concreto referência, com 30% e 50% de ACBC. Todos os valores apresentados ficaram acima dos valores estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2004).

Em concretos produzidos com até 20% de substituição da CBC pelo cimento Portland, Cordeiro et al. (2009) conseguiram valores de módulo de elasticidade variando entre 32,7 GPa e 34,2 GPa. Além disso, eles concluíram que os concretos com a incorporação da CBC até aquele teor apresentam o mesmo desempenho mecânico dos concretos usando somente o aglomerante convencional.

Em suma, é possível afirmar que a aplicação da ACBC como agregado miúdo aumentou a resistência à compressão simples do concreto nas primeiras idades de concreto, em comparação a uma amostra de referência. As demais propriedades mecânicas do concreto não sofreram influência significativa com a incorporação da ACBC, sendo mantidas as mesmas características que as de um concreto convencional.

## 5.8 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS

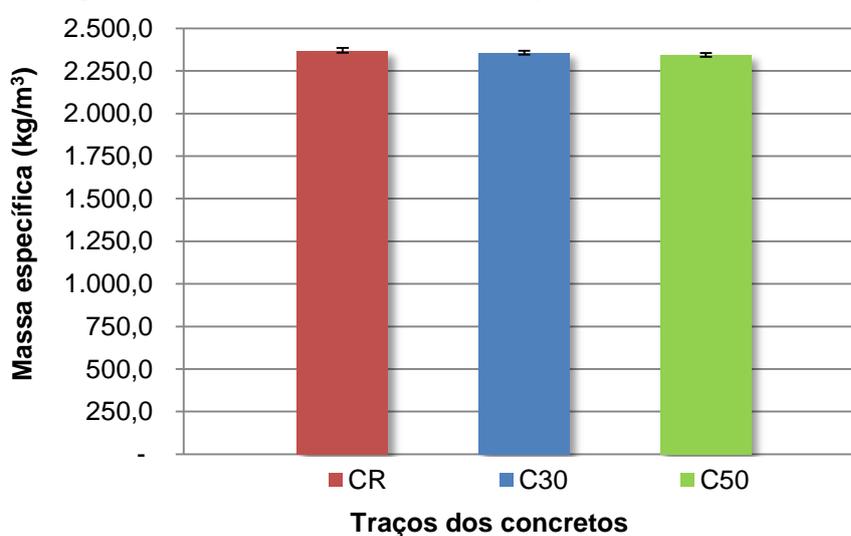
As propriedades físicas dos concretos, aos 28 dias, foram analisadas a partir dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios.

Os resultados de massa específica dos concretos, em  $\text{kg/m}^3$ , foram apresentados na Tabela 5.40.

**Tabela 5.40 – Resultados do ensaio de massa específica dos concretos**

Traço	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de variação (%)
CR	2.371,58	13,79	1%
C30	2.357,84	11,15	1%
C50	2.344,51	11,89	1%

A representação gráfica dos resultados de massa específica dos concretos foi apresentada na Figura 5.25.

**Figura 5.25 – Resultados da massa específica dos concretos**

(Fonte: próprio autor)

Para se verificar a significância de variação dos resultados, elaborou-se uma análise de variância conforme apresentada na Tabela 5.41.

**Tabela 5.41 – ANOVA para massa específica dos concretos**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	1099,3230	2	549,6616	<b>3,6191</b>	0,0931	<b>5,1433</b>
Erro	911,2755	6	151,8793			
Total	2010,5990	8				<i>não significativo</i>

Como o valor de F é inferior ao valor de F crítico, tem-se que a variação apresentada pela média das massas específicas obedece à hipótese nula  $H_0$ , onde é possível considerar que os resultados obtidos são estatisticamente equivalentes, a um nível de significância de 5%. Deste modo, pode-se afirmar que a ACBC não provoca diferença significativa na massa específica dos concretos.

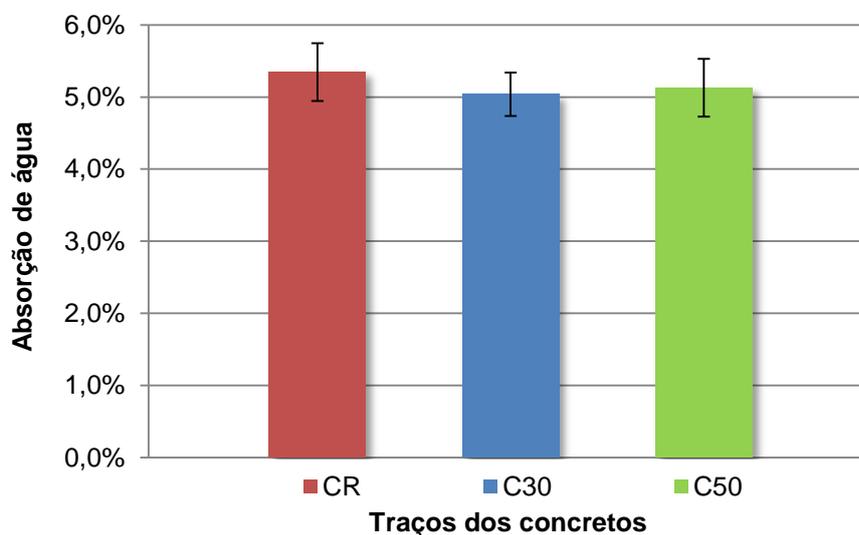
Além disso, a absorção de água foi analisada para os concretos, cujos valores podem ser verificados na Tabela 5.42.

**Tabela 5.42 – Resultados do ensaio de absorção de água dos concretos**

Traço	Absorção (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
CR	5,3	0,4	7%
C30	5,0	0,3	6%
C50	5,1	0,4	8%

Os resultados de absorção de água foram apresentados também na Figura 5.26.

**Figura 5.26 – Resultados de absorção de água dos concretos**



(Fonte: próprio autor)

Da mesma forma, foi verificada a consistência dos dados do ensaio de absorção de água pelo teste ANOVA, com nível de significância  $\alpha$  de 5% (Tabela 5.43).

**Tabela 5.43 – ANOVA para absorção de água dos concretos**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	1,51E-05	2	7,57E-06	<b>0,5916</b>	0,5828	<b>5,1433</b>
Erro	7,68E-05	6	1,28E-05			
Total	9,20E-05	8				<i>não significativo</i>

Pelos valores obtidos de F e F crítico, é possível considerar válida a hipótese de que as médias dos valores de absorção de água são estatisticamente equivalentes, a um nível

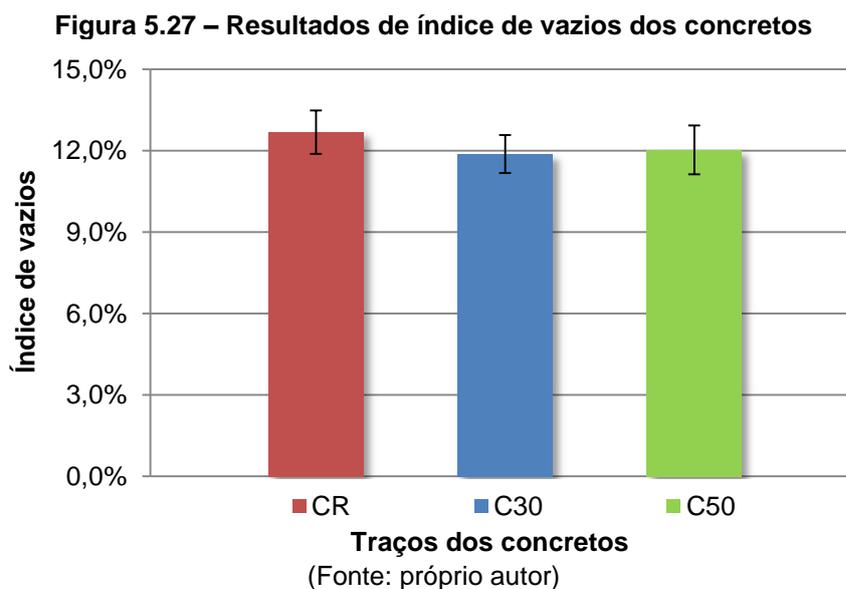
de significância de 5%, entre os concretos CR, C30 e C50. Com isso, pode-se afirmar que a ACBC também não provocou influência significativa nesta propriedade.

Por fim, foram apresentados os resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos, apresentados na Tabela 5.44.

**Tabela 5.44 – Resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos**

Traço	Índice de vazios (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
CR	12,7	0,8	6%
C30	11,9	0,7	6%
C50	12,0	0,9	7%

Os valores do índice de vazios foram representados de forma gráfica, conforme verificado na Figura 5.27.



A análise ANOVA para o índice de vazios também foi aplicada, e os resultados foram apresentados na Tabela 5.45, com nível de significância  $\alpha$  de 5%.

**Tabela 5.45 – ANOVA para índice de vazios dos concretos**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	0,000109	2	5,47E-05	<b>0,8760</b>	0,4637	<b>5,1433</b>
Erro	0,000375	6	6,25E-05			
Total	0,000484	8				<i>não significativo</i>

Assim como nas demais propriedades físicas do concreto, os valores das médias do índice de vazios não apresentaram variação significativa. Isso pode ser afirmado devido a não rejeição da hipótese nula  $H_0$  dada pela comparação dos valores de  $F$  e  $F$  crítico.

Verifica-se que o comportamento das propriedades físicas do concreto se diferiu daquelas analisadas para as argamassas (item 5.3). Este fato pode ser atribuído à maior exsudação observado nas argamassas, cujo traço seguiu o proporcionamento estabelecido para o concreto (com retirada do agregado graúdo e ajuste da relação  $a/c$ ). De acordo com Kulakowski (2002) esta maior exsudação das argamassas pode ter ocorrido pela mudança do esqueleto granular quando se retira a fração do agregado graúdo, que modifica a reologia do material. Entretanto, a maior exsudação das argamassas em relação ao concreto não pode ser considerada uma regra geral.

Com tudo, é possível verificar que a substituição da ACBC não provocou influência significativa nas propriedades físicas do concreto. Apesar de pequenas variações percebidas nos ensaios realizados, essa diferença pode ser atribuída, estatisticamente, aos erros experimentais inerentes aos procedimentos.

Ainda assim, Bessa (2011) relacionou os valores de teor de vazios e a absorção de água com os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão. Pelos resultados, foi verificada uma diminuição dos poros dos concretos com a incorporação da ACBC, levando ao aumento de resistência dos concretos com a areia de cinza.

Desta forma, é possível que exista algum efeito físico de preenchimento dos microporos pela ACBC na mistura do concreto, o qual não foi capaz de ser percebido pelas análises realizadas. Com isso, se faz necessário um estudo mais específico e detalhado para verificação da microestrutura (poros) dos concretos contendo ACBC, procurando compreender a sua formação, distribuição e dimensões.

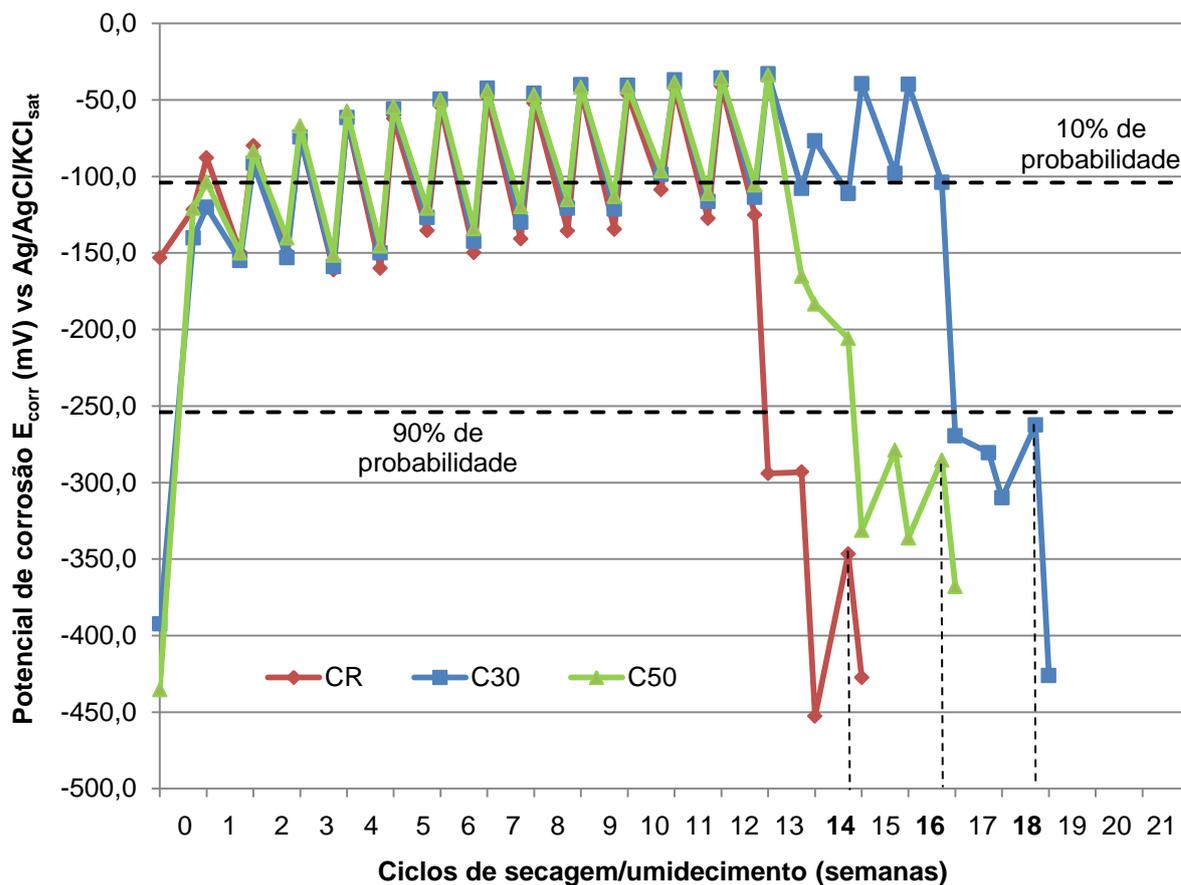
## **5.9 POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CONCRETOS**

O potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) dos concretos foi analisado a fim de se verificar o comportamento de cada traço (CR, C30 e C50) frente à probabilidade de corrosão das armaduras.

Os valores do potencial de corrosão das armaduras foram apresentados no APÊNDICE. A evolução das médias dos potenciais de corrosão medidos nas barras dos corpos de prova de concreto, contendo diferentes teores de ACBC, pode ser verificada na Figura 5.28. Os limites das prováveis situações de corrosibilidade também foram apresentados, sendo que valores acima de -104 mV correspondem a menos de 10% de

probabilidade de corrosão, e valores abaixo de -254 mV indicam uma probabilidade de corrosão maior que 90%, considerando um eletrodo de referência de Ag/AgCl/KCl<sub>sat</sub>.

**Figura 5.28 – Evolução dos potenciais de corrosão das barras dos corpos de prova de concreto**



(Fonte: próprio autor)

Para cada traço de concreto em análise, o ensaio foi encerrado quando todas as armaduras apresentaram potencial de corrosão que indicavam o rompimento da camada passivadora. Esse rompimento foi balizado quando dois valores consecutivos de potencial de corrosão, medidos no semiciclo de umedecimento, atingissem o limite de 90% de probabilidade de corrosão.

As médias foram obtidas a partir de três corpos de prova para cada traço, sendo que a análise apresentada na Figura 5.28 foi realizada para as barras com potenciais de equilíbrio menos negativos. Mesmo assim, a análise das barras com potenciais mais negativos apresentaram o mesmo comportamento, com a diferença do tempo individual do rompimento da camada passivadora. Quanto à variabilidade das amostras verificou-se que, para os concretos CR e C30, os dados apresentaram um coeficiente de variação máximo de 15%, e para o concreto C50, o coeficiente máximo verificado foi de 28%.

O ensaio teve duração de 18 semanas (126 dias), sendo que cada semana correspondeu a um ciclo no processo de envelhecimento acelerado dos concretos. Cada ciclo foi composto por um semiciclo de secagem em estufa a  $50^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  (período de cinco dias) e semiciclo de umedecimento por imersão em solução salina de NaCl 3,5% de concentração (período de dois dias).

No primeiro ciclo (ciclo zero), se verificou medidas de potenciais muito discrepantes para os concretos C30 e C50. Isso se deve ao fato das amostras terem mudado as suas condições de ambiente já que, antes dos ciclos de envelhecimento, todos os concretos estavam em uma situação tal de equilíbrio proporcionada pelo ambiente úmido da câmara de cura (período de 28 dias em câmara com  $95\% \pm 5\%$  de umidade relativa). Contudo, a partir da semana seguinte, todos os concretos já apresentaram um equilíbrio sob as novas condições que a eles foram impostas (ciclos de secagem e umedecimento).

As medidas de potenciais em cada um dos semiciclos foram variadas (mais ou menos negativas) devido ao teor de umidade dos corpos de prova. A influência do teor de umidade sobre os valores de potencial de corrosão pode ser justificada, principalmente, pela queda ôhmica do concreto. De acordo com Cascudo (1997), a queda ôhmica pode ser entendida como uma queda que se verifica no potencial de corrosão devida à alta resistividade elétrica do meio (no caso em questão da camada de concreto), entre o eletrodo de trabalho (barra de aço) e o eletrodo de referência.

Os valores de potenciais de corrosão mais negativos foram obtidos após os ciclos de secagem dos concretos, os quais apresentavam alta resistividade elétrica, devido à dificuldade de movimentação dos íons. Após a fase de imersão, o fluxo dos íons era mais facilmente difundido no concreto, através da solução aquosa de NaCl, fazendo com que a queda ôhmica fosse minimizada e os potenciais de corrosão apresentassem valores mais positivos.

Em geral, durante o período de passivação das barras de aço, os concretos apresentaram valores de potencial de corrosão entre -160 mV e -33,8 mV. Quando se verificou o rompimento da camada passivadora, em todas as amostras, o potencial de corrosão apresentou uma queda abrupta. Este comportamento também foi verificado por Santos (2006).

Pelos resultados obtidos, foi possível verificar o início do processo corrosivo, isto é, fim do período de iniciação e início do período de propagação da corrosão em cada uma das amostras analisadas. O concreto de referência foi o primeiro a apresentar um rompimento da camada passivadora do aço, visto que o potencial de corrosão limite foi atingido na 14ª semana de ensaio. Esta verificação foi seguida pelo concreto C50, com 50% de substituição

da areia natural, na 16ª semana. A última amostra a apresentar um rompimento no filme passivador foi o concreto C30, com 30% de substituição da areia natural, verificado na 18ª semana.

Nos trabalhos realizados por Santos (2006), os concretos com adição de sílica ativa e cobertura de 20 mm, apresentaram períodos de iniciação inferiores ao concreto referência. Para uma relação  $a/c$  de 0,5, a despassivação da armadura no concreto com sílica ativa ocorreu aos 58 dias, e no concreto padrão, 72 dias. Entretanto, segundo o autor, esse comportamento não se mostrou coerente com as características microestruturais das misturas.

Por outro lado, Cabral (2000) verificou uma melhora na despassivação de armaduras em sistemas de reparo com adição de sílica ativa, uma vez que se verificou um depósito dos grãos de sílica entre os poros da argamassa (efeito microfiller), proporcionando uma mudança microestrutural por meio do refinamento dos poros da mistura.

Nos estudos desenvolvidos por Ribeiro (2010), a despassivação das barras em corpos de prova de concreto, contendo lama vermelha como substituto do cimento Portland, ocorreu posteriormente às das amostras de referência, para todos os teores de adição, sendo o dobro do tempo para as amostras contendo 10%.

Bandala et al. (2011) também verificaram o potencial de corrosão de concretos utilizando ACBC, com a diferença de utilizarem a cinza como adição ao cimento Portland. O ensaio teve duração de 14 meses em exposição em solução de NaCl. Os concretos com teores de 10% e 15% de CBC foram os primeiros a iniciar o processo corrosivo, por volta do 11º mês.

Quanto à amplitude de variação das medidas mais e menos negativas (amostras secas e úmidas, respectivamente), não se verificou, no estado passivo, diferenças significativas entre os concretos com e sem ACBC. Apesar disso, visualmente pôde-se perceber um ligeiro incremento nas amplitudes entre o período correspondente ao 3º e o 12º ciclo (período de passivação da armadura). À medida que o teor de ACBC no concreto aumentava, foi verificada uma pequena diminuição da amplitude (mais uma vez, diminuição esta pouco significativa).

Para se verificar a significância da amplitude de variação entre os três traços estudados, em um nível  $\alpha$  de 5%, foi apresentada a Tabela 5.46 com a análise de variância desta amplitude no ciclo 9 (maior variação verificada durante o período de passivação).

**Tabela 5.46 – ANOVA para a amplitude de variação das medidas de potencial de corrosão**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	693,5556	2	346,7778	<b>4,7122</b>	0,0589	<b>5,1433</b>
Erro	441,5467	6	73,5911			
Total	1.135,1020	8				<i>não significativo</i>

Como o valor de F é menor do que o F crítico, não é possível rejeitar a hipótese  $H_0$ , considerando, portanto, que a amplitude de variação dos concretos com e sem ACBC é estatisticamente a mesma.

Santos (2006) verificou a amplitude das medições do potencial de corrosão nos concretos com adição de sílica ativa. As misturas de referência (sem adição de sílica ativa) apresentaram amplitude de variação mais significativa em função das características da rede de poros, os quais apresentaram maior capacidade de absorção e maior facilidade em perderem água. Por outro lado, as misturas que continham sílica ativa apresentaram valores de potencial medidos muito semelhantes, independentemente do semiciclo utilizado. A velocidade de perda de umidade destas misturas foi menor do que a apresentada pelas misturas de referência (concretos mais compactos). Desta forma, concluiu-se que, ao final da etapa de secagem, a umidade nas regiões próximas às armaduras não tenha sofrido alterações suficientes para alterar as características do eletrólito e, conseqüentemente, as medidas do potencial das barras.

Ribeiro (2010) também analisou a amplitude de variação das medidas de potencial de corrosão. Nas amostras de referência a amplitude entre os estados seco e úmido foi mais acentuada do que nas amostras contendo lama vermelha. Essa constatação foi atribuída à maior rede de poros capilares presente no concreto referência, apresentando maior capacidade de absorção da solução contendo NaCl (sucção capilar) e uma maior dificuldade em perder esta umidade (menor porosidade total), em comparação às demais amostras.

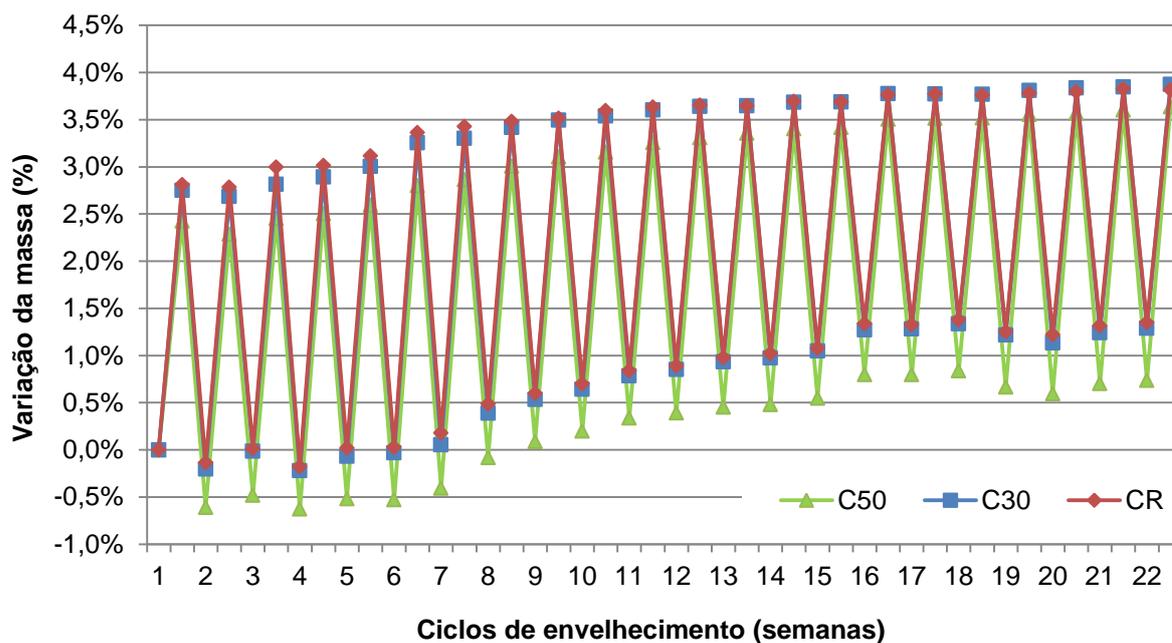
De fato, o efeito físico de diminuição dos poros pode não ter sido verificado com relevância nos concretos em estudo, uma vez que a amplitude de variação das medições não apresentou diferença significativa entre os diferentes traços. Somado a isto, as propriedades físicas de índice de vazios e absorção de água apresentaram valores estatisticamente equivalentes, a um nível de significância de 5%, para todos os concretos analisados (Tabela 5.42 e Tabela 5.44).

Todavia, a partir das amostras ensaiadas, foi possível afirmar que a incorporação da ACBC no concreto pode retardar a probabilidade de corrosão da armadura, sendo que o teor de 30% de substituição é o que apresentou um maior retardo na ativação da corrosão.

Esse retardamento do início do processo corrosivo pode estar relacionado ao aumento da alcalinidade proporcionado pela ACBC no concreto, cujo extrato solubilizado dos concretos com e sem ACBC foi verificado por Bessa (2011). De acordo com Cascudo (1997), a susceptibilidade ao ataque por pites (ação por cloretos) aumenta ao diminuir a alcalinidade proporcionada pelo filme de passivação. Com isso, entende-se que o balanço entre a alcalinidade, dada pela atividade do íon  $\text{OH}^-$ , e a acidez, dada pela atividade do íon  $\text{Cl}^-$ , seja o responsável pela manutenção da capa passivadora do aço.

Além disso, e ainda considerando a questão da microestrutura dos poros e acúmulo de NaCl, foi verificada a variação de massa dos corpos de prova de concreto ao longo dos ciclos de secagem e umedecimento. O resultado desta variação, em relação à massa seca inicial, foi apresentado na Figura 5.29. A massa das amostras foi monitorada até a 22ª semana, quando os concretos foram rompidos para retirada das barras de aço.

**Figura 5.29 – Variação da massa dos corpos de prova de concreto ao longo dos ciclos de envelhecimento**



(Fonte: próprio autor)

Com o término dos ciclos de secagem e umedecimento, todos os traços analisados apresentaram um aumento da sua massa inicial. Este fato foi associado ao acúmulo gradativo de NaCl na microestrutura do concretos e ao caráter higroscópico de retenção de água deste sal, o que aumenta o grau de umidade nos semiciclos de secagem (SANTOS, 2006).

Segundo Bauer & Helene (1996), o semiciclo de secagem atua de forma diferenciada em função do volume total dos poros existentes no concreto e da distribuição dos seus diâmetros. Desta forma, quando submetidos às mesmas condições de umidade relativa e temperatura, diferentes misturas de concreto respondem de forma diferenciada, quanto ao grau de umidade final, em função da sua porosidade. Por causa disto, as misturas de concreto com maior volume e dimensão de poros permitem que a secagem seja mais efetiva, enquanto que, o contrário ocorre com misturas cujo volume e diâmetro dos poros é menor. Portanto, poros largos e contínuos perdem água mais facilmente do que poros pequenos e tortuosos.

Entretanto, para os corpos de prova analisados, foi possível verificar que a amplitude de variação de massa entre os diferentes concretos não apresentaram diferenças significativas. Uma vez que as características físicas dos concretos não apresentaram grandes discrepâncias, a verificação da amplitude somente confirmou que a absorção e secagem das misturas analisadas obtiveram desempenhos similares.

Ainda assim, vale considerar que uma possível análise mais aprofundada da distribuição dos poros no concreto se faz necessária para se verificar o real efeito da incorporação da ACBC na mistura. É possível que a ACBC, por apresentar uma granulometria menor à da areia, possa proporcionar um efeito físico no concreto, por meio do preenchimento dos microporos, contribuindo para retardamento da ruptura do filme passivador da armadura.

Salienta-se que a análise de potencial de corrosão oferece apenas uma avaliação qualitativa do processo corrosivo, indicando a probabilidade de despassivação das armaduras no concreto. Entretanto, estudos feitos por Santos (2006) verificaram que, na maioria dos casos, a avaliação da duração da fase de iniciação da corrosão por meio de tal parâmetro eletroquímico coincide com as avaliações feitas utilizando parâmetros eletroquímicos mais precisos, como por exemplo, a intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ).

## **5.10 TAXA DE CORROSÃO DAS ARMADURAS**

Ao final dos ensaios de potencial de corrosão, foi escolhida uma amostra de cada traço (as que apresentaram valores mais negativos de  $E_{corr}$ ) para verificação da taxa de corrosão das armaduras, considerando as curvas de polarização. Essa medição, utilizando um potenciostato, foi realizada após 22 ciclos de envelhecimento (secagem e umedecimento), com os corpos de prova saturados em solução aquosa de NaCl, 3,5% de concentração.

Inicialmente, foi verificado o potencial de corrosão em circuito aberto ( $E_{\text{corr}}$ ) de cada uma das amostras, os quais foram apresentados na Tabela 5.47. Esse potencial indica o equilíbrio do sistema, onde as correntes anódicas e catódicas são de igual magnitude, ou seja, a corrente total resultante é nula. Desta forma, o  $E_{\text{corr}}$  é considerado aquele potencial no qual a taxa de oxidação é igual à taxa de redução, isto é, onde todos os elétrons liberados nas reações anódicas de oxidação são consumidos nas reações catódicas de redução. Com isso, a amostra se apresenta em regime estacionário com o meio, embora a corrosão seja visível (CASCUDO, 1997).

**Tabela 5.47 – Potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) das amostras corroídas**

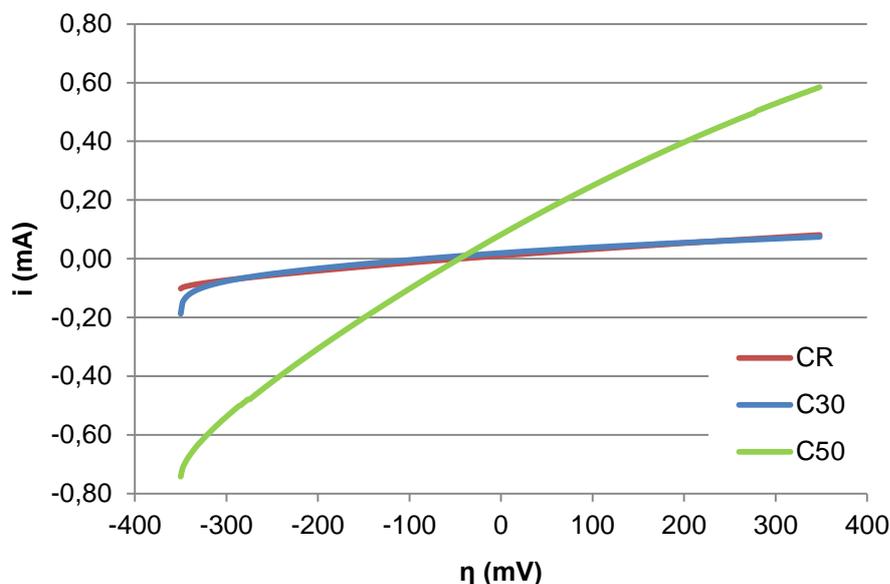
Traço	$E_{\text{corr}}$ (mV)
CR	-557
C30	-578
C50	-637

De fato, as amostras estão em um estado ativo de corrosão, visto que os valores de  $E_{\text{corr}}$  são inferiores a -254 mV, considerando um eletrodo de referência de Ag/AgCl/KCl<sub>sat</sub>.

Para uma comparação dos valores de corrente entre as amostras com e sem ACBC, as armaduras foram polarizadas variando o potencial em torno do  $E_{\text{corr}}$ . A Figura 5.30 apresenta uma comparação entre as correntes obtidas em cada corpo de prova, considerando um sobrepotencial ( $\eta$ ). Esta foi uma representação em escala linear de corrente medida e sobrepotencial calculado. O sobrepotencial foi obtido a partir da diferença entre os potenciais medidos e o  $E_{\text{corr}}$  de cada amostra, sendo realizada uma varredura em torno do  $E_{\text{corr}} \pm 350$  mV.

Teoricamente, o  $E_{\text{corr}}$  de cada barra analisada deveria apresentar um valor nulo de corrente, já que a taxa de oxidação teria que ser igual à taxa de redução (correntes anódicas e catódicas iguais). Isso seria representado por todas as curvas passando pela coordenada (0,0). Entretanto, se verifica um pequeno desvio desse valor, atribuído, especialmente, à queda ôhmica do concreto.

**Figura 5.30 – Curvas de polarização potenciodinâmica das armaduras nos concretos (escala linear)**

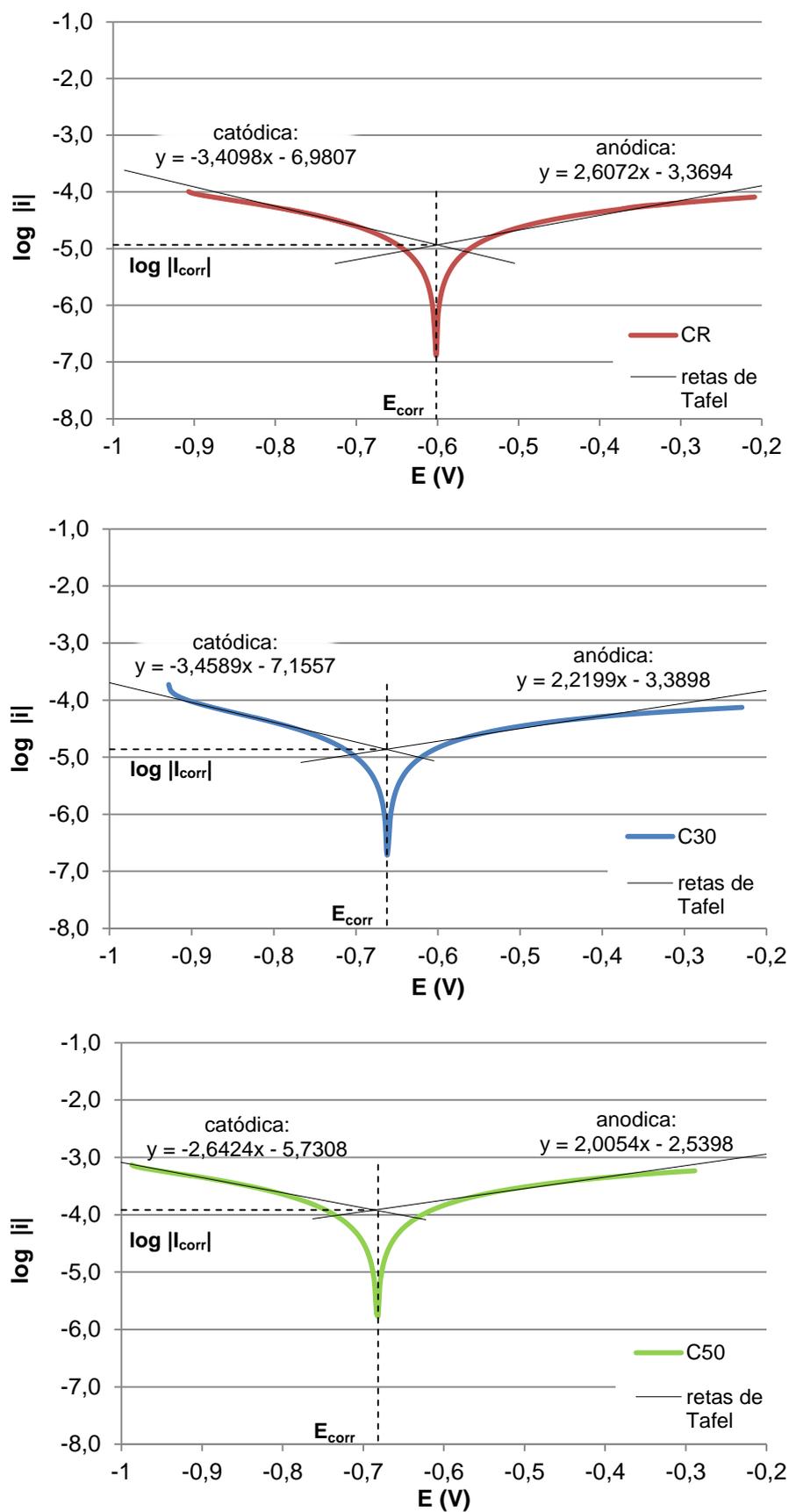


(Fonte: próprio autor)

Nesta análise observa-se uma dissolução ativa do Ferro, sendo que a amostra C50 apresenta corrente mais elevada tanto no sentido anódico (valores positivos de  $\eta$ ) como no catódico (valores negativos de  $\eta$ ). Já as amostras CR e C30 apresentam comportamentos muito semelhantes entre si. Além disso, as taxas de corrosão são diretamente proporcionais às correntes de corrosão, ou seja, maiores valores de corrente elétrica passante no sistema podem indicar uma maior velocidade de corrosão. Desta forma, apenas por uma avaliação visual, é possível deduzir que as velocidades de corrosão são maiores para o C50 e similares para o CR e o C30.

Para obter os valores das taxas de corrosão de cada armadura, considerando diferentes concretos, foram elaboradas as curvas de polarização potenciodinâmicas, em escala logarítmica. A partir delas, foi possível traçar as retas de Tafel pela extrapolação do trecho linear verificado nas variações anódicas e catódicas. A intersecção entre essas duas retas possibilitou estimar, graficamente, as correntes de corrosão instantânea ( $I_{corr}$ ) das armaduras. As curvas de polarização das armaduras nos concretos em estudo (CR, C30 e C50) podem ser verificadas na Figura 5.31, bem como as extrapolações de Tafel (anódica e catódica). As equações das respectivas retas de Tafel foram obtidas a fim de se calcular a intersecções entre elas.

Figura 5.31 – Curvas de polarização potenciodinâmica das armaduras (escala logarítmica)



(Fonte: próprio autor)

A partir da intersecção das retas de Tafel, foi possível determinar o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) e a corrente instantânea de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ). Dividindo-se o valor de ( $I_{\text{corr}}$ ) pela área da armadura polarizada ( $A$ ), tem-se a taxa ou velocidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ), caracterizada pela densidade de corrosão (em  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Além disso, foi possível avaliar a taxa de corrosão pelo indicativo de sua propagação (em  $\mu\text{m}/\text{ano}$ ) a partir da relação apresentada por Ismail e Soleymani (2002). Os valores calculados dos parâmetros de corrosão das barras referentes às amostras de concreto foram apresentados na Tabela 5.48.

**Tabela 5.48 – Resultados das taxas de corrosão das armaduras nos concretos**

Traço	$E_{\text{corr}}$ (mV)	$\log  I_{\text{corr}} $	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}$ )	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )
CR	-600,18	-4,93	11,6	0,73	1,88
C30	-663,15	-4,86	13,7	0,86	2,22
C50	-686,56	-3,92	121,2	7,66	19,61

Com esses resultados, se confirma a verificação visual do gráfico apresentado na Figura 5.30, onde o concreto C50 apresentou a maior taxa de corrosão entre os concretos estudados (cerca de 10 vezes maior do que a taxa verificada para a amostra referência). As amostras CR e C30 não apresentaram diferenças significativas nos valores de velocidade de corrosão.

Nota-se que os valores de  $E_{\text{corr}}$  calculados graficamente pela intersecção das retas de Tafel se diferem, ligeiramente, dos valores de  $E_{\text{corr}}$  medidos inicialmente (Tabela 5.47). Além do erro de extrapolação dos trechos lineares utilizados para o cálculo, a queda ôhmica do concreto pode provocar alterações das relações corrente-potencial, gerando curvas de polarização distorcidas, conforme exposto por Cascudo (1997). Entretanto, o método de curvas de polarização se mostra eficiente na avaliação da cinética do processo corrosivo.

Além disso, foi possível classificar as taxas de corrosão obtidas em cada amostra, a partir dos critérios apresentados por Andrade e Alonso (2001). As amostras CR e C30 apresentaram valores de densidade de corrente entre 0,5 e 1,0  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Deste modo, a corrosão destas barras pode ser classificada em um nível moderado, mas não severo. Já a amostra C50, por apresentar um valor de velocidade de corrosão maior do que 1,0  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , pode ser definida como um nível alto de corrosão.

No intuito de complementar a análise da taxa de corrosão, as barras de aço foram retiradas dos corpos de prova de concreto, limpas e verificadas as suas respectivas perdas de massa. Entretanto, devido às baixas variações de massa, não foi possível ratificar efetivamente a perda de massa das amostras em estudo. Para que esta análise fosse

viabilizada seria necessário aguardar o avanço do processo corrosivo para a ocorrência de maiores produtos de corrosão (tempo estimado superior a um ano).

Contudo, ainda assim foi possível realizar uma análise qualitativa da perda de massa das barras, por meio de uma inspeção visual. Na Figura 5.32 pode ser observada a perda de massa verificada nas barras mais corroídas, pertencentes às amostras C50.

**Figura 5.32 – Perda de massa devido à corrosão das armaduras (amostras C50)**



(Fonte: próprio autor)

De fato, as barras pertencentes às amostras de concreto C50 foram as que apresentaram maior taxa de corrosão, visto que foram nelas que se observou uma maior perda de massa em suas seções. Na Figura 5.32 observaram-se, claramente, os pites da corrosão localizada das barras de aço dos concretos com 50% de substituição da areia convencional.

Bandala et al. (2011) verificaram que a substituição de até 20% do cimento Portland por ACBC provoca uma redução considerável da taxa de corrosão das armaduras, comparada ao concreto convencional. Segundo os autores, a ACBC pode contribuir para a densificação da matriz cimentícia, prevenindo a entrada de agentes agressivos.

Em especial nos concretos em estudo, foi verificado no item 5.6 que a condutividade elétrica da solução aquosa dos poros da argamassa com ACBC é maior do que a da argamassa de referência. Com isso, é possível que a maior condutividade elétrica da mistura com ACBC esteja contribuindo para a propagação da corrosão em maior velocidade, especialmente na mistura com 50% de substituição, devido ao aumento da mobilidade dos íons em seu interior.

Apesar de a ACBC ter provocado um retardo no início do processo de corrosão, verificado pelo ensaio de potencial de corrosão, este processo, após iniciado, se desenvolve em velocidades maiores em concretos contendo o resíduo, principalmente com teores superiores a 30% de substituição. Ou seja, a incorporação da ACBC leva ao retardo da

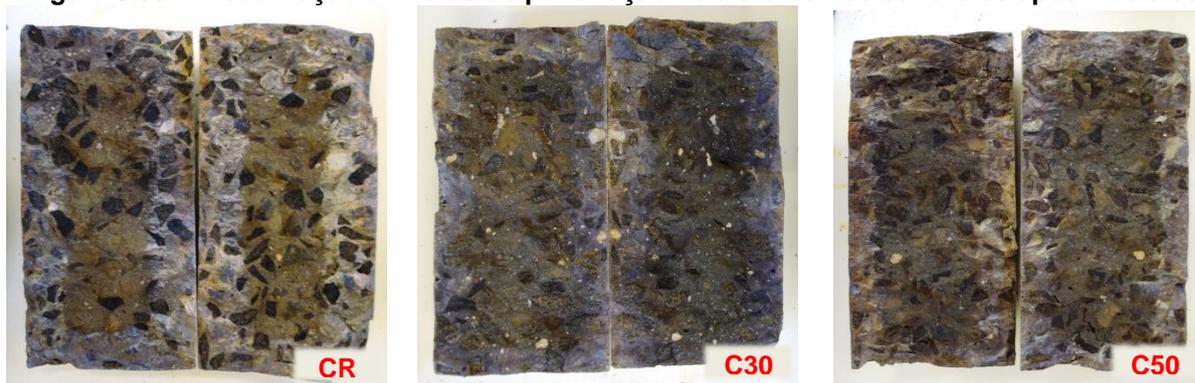
probabilidade de ocorrência da corrosão, mas quando esta se inicia, a taxa com que a corrosão se desenvolve é maior nos concretos contendo ACBC em teores elevados.

### 5.11 PENETRAÇÃO DE CLORETOS NOS CONCRETOS

Os corpos de prova cilíndricos de concreto, submetidos aos mesmos ciclos de envelhecimento (secagem e umedecimento) utilizados no ensaio de potencial de corrosão, tiveram sua frente de penetração de cloretos verificada após 24 semanas. Esta análise se deu pela ruptura diametral dos corpos de prova, seguida por aspersão de solução de  $\text{AgNO}_3$  e solução de fluoresceína, respectivamente.

As imagens dos concretos após o tratamento com as soluções foram apresentadas na Figura 5.33. Foram analisados dois corpos de prova de dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) de cada traço.

**Figura 5.33 – Visualização da frente de penetração de cloretos nos concretos após 24 ciclos**



(Fonte: próprio autor)

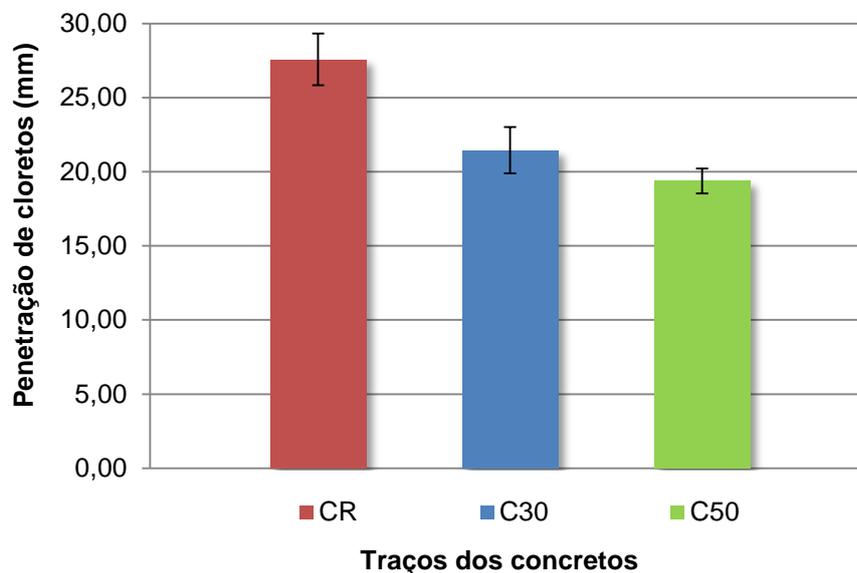
Este método é qualitativo, indicando a presença de cloretos na forma de íons livres, que são os que efetivamente causam preocupação quanto à corrosão. Com um paquímetro digital foi verificada a profundidade de penetração desses cloretos, obtida a partir da medida da espessura mais clara visualizada nos corpos de prova. Os resultados foram apresentados na Tabela 5.49.

**Tabela 5.49 – Resultados da espessura de penetração de cloretos dos concretos**

Traço	Espessura da frente (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de variação (%)
CR	27,58	1,74	6%
C30	21,45	1,56	7%
C50	19,37	0,84	4%

Esses resultados também foram representados na forma gráfica, conforme apresentado pela Figura 5.34.

**Figura 5.34 – Resultados da frente de penetração de cloretos nos concretos**



(Fonte: próprio autor)

Esses valores foram analisados pelo teste ANOVA para se verificar a significância das diferenças obtidas nos resultados. Esta análise, considerando um nível  $\alpha$  de significância de 5%, foi apresentada na Tabela 5.50.

**Tabela 5.50 – ANOVA para as medidas da frente de penetração de cloretos dos concretos**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	valor-P	F crítico
Fator	1.597,5971	2	798,7983	<b>322,5615</b>	1,56E-53	<b>3,0598</b>
Erro	351,6519	142	2,4764			
Total	1.949,2480	144				<i>significativo</i>

A partir da comparação entre os valores obtidos de F e F crítico, é possível rejeitar a hipótese  $H_0$ , indicando que existe pelo menos um par de médias que são, significativamente, diferentes. Para se verificar quais dessas comparações apresentam diferenças entre seus valores, foi realizado o Teste de Tukey com duas amostras presumindo variâncias equivalentes (Tabela 5.51). De fato os valores apresentam dispersões homogêneas, caracterizando-os como homoscedásticos, pois todas as relações entre os valores das variâncias são menores do que 4.

**Tabela 5.51 – Teste de Tukey para a frente de penetração de cloretos dos concretos**

	CR	C30	CR	C50	C30	C50
Média	27,58	21,45	27,58	19,37	21,45	19,37
Variância	3,0295	2,4254	3,0295	2,1116	2,4254	2,1116
Observações	40	52	40	53	52	53
Variância agrupada	2,6872		2,5050		2,2670	
Grau de liberdade	90		91		103	
T	<b>17,7751</b>		<b>24,6815</b>		<b>6,9881</b>	
P(T<=t) bi-caudal	1,72E-31		2,13E-42		1,42E-10	
t crítico bi-caudal	<b>1,6620</b>		<b>1,6620</b>		<b>1,6598</b>	
	<i>significativo</i>		<i>significativo</i>		<i>significativo</i>	

Pela análise comparativa entre os valores de T e t crítico entre cada par de traços verificado, é possível afirmar que todas as médias apresentadas são, estatisticamente, diferentes umas das outras. Dessa forma, a incorporação da ACBC provoca influência significativa na profundidade de penetração de cloretos nos concretos. Esta análise está alinhada aos resultados obtidos também para as argamassas (item 5.5). Além disso, foi verificado também que à medida que o aumento no teor de ACBC, provoca uma redução na espessura da frente de penetração dos cloretos.

Sarmiento & Vanderlei (2011) também verificaram a profundidade de penetração de cloreto nos concretos utilizando ACBC como agregado miúdo. Todos os concretos com ACBC apresentaram uma diminuição desta frente, sendo que os teores entre 15% e 25% foram os que apresentaram melhor desempenho.

Alguns autores atribuíram a diminuição da penetração de cloretos em concretos à diminuição dos poros e da interconectividade dos capilares, provocados principalmente pela incorporação de algumas adições minerais (CHINDAPRASIRT et al., 2007; CHINDAPRASIRT et al., 2008; YAZICI, 2008; CHALEE et al., 2009; GASTALDINI et al., 2010).

Entretanto, considerando as análises anteriores do concreto com ACBC, é possível que a penetração dos íons cloretos não esteja relacionada, em maior relevância, pela absorção ou permeabilidade do concreto, visto que as análises de índice de vazios, absorção de água e amplitude de variação de massa, ao longo dos ciclos de envelhecimento, não apresentaram diferenças significativas entre as misturas em estudo. Quanto à migração iônica, também é pouco provável que ela seja o principal mecanismo de transporte verificado nos concretos, uma vez que envolve processos eletroquímicos de geração de corrente elétrica para essa migração, inexistente para as amostras estudadas.

Desta forma, é possível que a diferença verificada na frente de penetração de cloretos, em forma de íons livres, entre os três concretos em estudo, seja atribuída, em maior importância, à difusão iônica.

De acordo com Cascudo (1997), a difusibilidade iônica acontece devido a gradientes de concentração iônica, seja entre o meio externo e o interior do concreto, seja dentro do próprio concreto. Essas diferenças nas concentrações de cloretos suscitam o movimento desses íons em busca de equilíbrio. Deste modo, a difusão iônica é o mecanismo de transporte predominante dos cloretos dentro do concreto, caso se verifique uma certa interconexão dos capilares e haja um eletrólito.

Este efeito de gradiente nas concentrações de cloretos pode ter ocorrido de maneira diferenciada no concreto referência e nos concretos com substituição de areia. No caso dos concretos com ACBC, ocorreram reações entre as espécies químicas presentes na cinza (Tabela 5.1) e a solução de NaCl na concentração de 3,5%. Essas reações levaram à diminuição da cristalização de cloretos no interior da amostra, pois houve a precipitação do  $Cl^-$  com espécies químicas presentes na ACBC, formando uma barreira que diminuiu a penetração dos cloretos. No caso do concreto referência, a cristalização dos cloretos ocorreu em uma profundidade de penetração maior pela não formação dessa barreira composta pelos produtos de precipitação.

Em suma, a incorporação da ACBC provocou um efeito positivo na verificação da frente de penetração de cloretos, uma vez que ela diminuiu a profundidade da ocorrência de cloretos livres, dificultando, assim, a ruptura do filme de passivação da armadura provocada por esses íons.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente trabalho buscou estudar e 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.

Desta forma, procurou-se correlacionar as diferentes análises realizadas, tanto em argamassas como em concretos, para indicar a potencialidade de corrosão da armadura em concretos com diferentes teores de ACBC.

Com relação às argamassas, foi possível constatar que a incorporação da ACBC não provocou influência na resistência à compressão, mesmo com um ligeiro incremento na porosidade das misturas. Este aumento dos poros pode estar relacionado ao incremento da relação água/cimento das argamassas com ACBC, necessário à manutenção do índice de consistência para a moldagem das amostras. Além disso, devido à sua menor granulometria, é possível que a ACBC tenha preenchido os menores poros das argamassas, contribuindo para que o valor médio dos diâmetros dos poros das amostras com ACBC seja maior do que a amostra referência.

Adicionalmente às constatações relacionadas à incorporação da ACBC na matriz cimentícia, destaca-se que, a partir do procedimento experimental, foi possível demonstrar a viabilidade da técnica de microscopia óptica. Esta técnica foi adequada para explicar o efeito da variação da permeabilidade por meio da distribuição e dimensão dos poros em argamassas, com e sem incorporação de ACBC.

Ainda em relação às argamassas, foram avaliadas as profundidades das frentes de carbonatação e de penetração de cloretos. A primeira apresentou um comportamento muito semelhante entre as misturas com e sem ACBC, provavelmente por elas apresentarem relações água/cimento inferiores a 0,5. Já na análise da penetração dos íons cloretos, foi possível verificar uma diminuição dessa profundidade nas argamassas com substituição da areia natural em teores de 30% e 50%, em todas as idades. Nos concretos, também se verificou uma diminuição da frente de penetração dos íons cloretos com a incorporação da ACBC.

Em relação à condutividade elétrica da solução aquosa dos poros das argamassas, os resultados mostraram que a incorporação da ACBC na matriz cimentícia pode levar a um

aumento da condutividade elétrica da mistura, ou seja, um incremento na mobilidade dos íons em seu interior.

Os resultados obtidos indicaram que nas primeiras idades houve um aumento da resistência à compressão com o incremento da substituição da areia natural pela ACBC. Considerando idades mais avançadas, os valores de resistência à compressão do concreto referência são estatisticamente equivalentes com os valores obtidos para os concretos com teores de 30% e 50% de substituição pela ACBC. As demais propriedades mecânicas, tais como resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, além das propriedades físicas de absorção, índice de vazios e massa específica, também não apresentaram diferenças significativas entre as amostras analisadas. Com isso, pode-se afirmar que o concreto com ACBC pode manter a mesma magnitude dos valores dessas propriedades, comparativamente a um concreto convencional.

Com a análise da durabilidade de corpos de prova de concreto armado, constatou-se que a ACBC pode diminuir a probabilidade de corrosão, devido ao retardo da despassivação das armaduras. Esta verificação se deu pelas medidas eletroquímicas de potencial de corrosão, por meio da indução da corrosão localizada por ataque acelerado de cloretos (ciclos de secagem e umedecimento). O concreto com 30% de substituição da areia natural foi o que apresentou melhor desempenho entre os concretos estudados, observando uma ruptura do filme passivador quatro ciclos após a amostra referência atingir o estado ativo de corrosão. Esse retardo no tempo de despassivação da armadura pode estar relacionado ao fato do concreto com ACBC apresentar um valor de pH maior, proporcionando um aumento da alcalinidade no filme protetor, além de uma possível influência física da ACBC em preenchimento dos microporos.

A incorporação da ACBC leva ao retardo da probabilidade de ocorrência da corrosão, mas após o início desta, em especial quando o teor é superior a 30%, a taxa com que a corrosão se desenvolve é maior do que àquela medida para os concretos com 0% e 30% de substituição de ACBC. Esta constatação pode estar relacionada ao aumento da condutividade elétrica proporcionado pela ACBC na matriz da argamassa.

O presente trabalho poderá contribuir em termos econômicos ao apresentar uma possibilidade de agregar valor a um resíduo para uso em concretos estruturais, os quais comprovadamente apresentam durabilidade adequada e resistência equivalente aos concretos convencionais, especialmente em teores de substituição de até 30% de ACBC.

Além disso, a utilização em escala da ACBC poderá gerar ganhos ambientais pela mitigação da mineração de areia natural para uso na construção civil e também por diminuir a demanda por aterros sanitários controlados para a deposição deste resíduo.

Vale destacar que o presente trabalho é pioneiro no estudo de potencial de corrosão em concretos utilizando a ACBC. Além disso, também foi utilizada pela primeira vez a técnica de microscopia óptica para avaliar a distribuição e tamanho dos poros em matrizes cimentícias. Ainda como proposição inovadora deste trabalho, foi oferecida uma diferenciação da nomenclatura das cinzas residuais provenientes do bagaço da cana-de-açúcar, quanto à sua forma de obtenção e tipo de aplicação: CBC (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) obtido a partir de processos específicos para uso como material pozolânico; e ACBC (areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar) obtidos diretamente das usinas para uso como material inerte.

## 6.1 CONCLUSÕES

- A profundidade de penetração dos íons cloretos indicou que a incorporação da ACBC, tanto nos teores de 30% e 50%, pode aumentar, significativamente, a resistência ao ataque de cloretos;
- A substituição da areia natural pela ACBC, especialmente com teor de 30%, pode levar à manutenção das propriedades físicas e à melhoria do desempenho mecânico e da durabilidade de concretos, quando comparados a uma mistura de referência;
- Os concretos com 30% de substituição do agregado miúdo convencional pela ACBC podem ser aplicados em elementos estruturais, tais como blocos de fundação, pilares, vigas, e lajes, sem perda do desempenho mecânico e da durabilidade. A incorporação da ACBC neste teor permite que o concreto mantenha a espessura de cobrimento de armadura compatível àquela utilizada em concretos convencionais, além de proporcionar um retardo na probabilidade de ocorrência de corrosão.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, foram apresentadas algumas sugestões para continuidade do trabalho, a fim de se avaliar, com maior propriedade, a influência da ACBC, como substituto do agregado miúdo convencional, na corrosão de armaduras em estruturas de concreto. São elas:

- Análise quantitativa da penetração e migração dos íons cloretos nos concretos com ACBC, buscando a caracterização da difusão iônica como mecanismos de transporte desses íons;

- Avaliação da dimensão e superfície específica da ACBC, e a sua interação com a matriz cimentícia, por meio da análise da microestrutura dos poros dos concretos;
- Avaliação da corrosão das armaduras utilizando outras técnicas eletroquímicas, tais como resistividade elétrica, resistência de polarização, impedância e ruído eletroquímico;
- Estudo do potencial de corrosão de armaduras em concretos utilizando outros tipos de cimento, tais como CP II Z, CP III, CP IV e CP V ARI, outras relações água/cimento e outros teores de substituição de ACBC;
- Estudo de concretos e argamassas utilizando a ACBC em conjunto com outros resíduos, tais como cinza da casca de arroz, cinza volante, resíduo de construção civil etc.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA EMPRAPA. **Cachaça**, Agência de Informação Embrapa: Cana-de-açúcar / Rogério Haruo Sakai (autor), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONT000fiog1ob502wyiv80z4s473agi63ul.html>>. Acesso em: 22 fev 2010.

AGÊNCIA EMPRAPA. **Processamento da cana-de-açúcar**, Agência de Informação Embrapa: Cana-de-açúcar / André Ricardo Alcarde (autor), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_102\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_102_22122006154841.html)>. Acesso em: 09 fev 2010.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR, H. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais e suas aplicações. In: **Tecnologias e materiais alternativos de construção** / W. J. Freire, A. L. Beraldo (coord.) – Campinas: Ed. UNICAMP, 2003.

ALESSI, N. P.; NAVARRO, V. R. Saúde e trabalho rural: o caso dos trabalhadores da cultura canavieira na região de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**. vol.13, Rio de Janeiro, 1997.

ALMEIDA, F. C. R.; LIMA, S. A.; MORETTI, J. P.; SALES, A. Avaliação de concretos com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio da profundidade de carbonatação. In: Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 7, **Anais...** Fortaleza: UVA, 2011.

AL-RAWAS, A. A. Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars. **Building and Environment**, Vol. 40, 2005, p. 1261-1266.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **T259-80**: Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington, D.C., 1980.

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

\_\_\_\_\_. **G1-03**: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. Philadelphia, 2011.

ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. **Construction and Building Materials**. v.15, p. 141-145, 2001.

ANDRADE, L. B. Evaluation of concrete incorporating bottom ash as natural aggregates replacement. **Waste Management**, v. 27, n. 9, p. 1190-1199, 2007.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da densidade absoluta. 2000.

\_\_\_\_\_. **NM 30** – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. 2001.

\_\_\_\_\_. **NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2002.

\_\_\_\_\_. **NM 46** – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. 2003.

\_\_\_\_\_. **NM 49** – Agregado miúdo – Determinação das impurezas orgânicas. 2001.

\_\_\_\_\_. **NM 52** – Agregado miúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2003.

\_\_\_\_\_. **NM 53** – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2001.

\_\_\_\_\_. **NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. 2003.

ASRAR, N.; MALIK, A. U.; AHMAD, S.; MUJAHID, F. S. Corrosion protection performance of microsilica added concretes in NaCl and seawater environments. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 213-219, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738** – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211** – Agregados para concretos. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218** – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis – método de ensaio. 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222** – Argamassas de concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 7223** – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 7224** – Determinação de área específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251** – Agregado em estado solto: determinação da massa unitária – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7480** – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522** – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578** – Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 11581** – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768** – Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13956** – Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 13957** – Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ASRAR, N.; MALIK, A.U.; AHMAD, S.; MUJAHID, F.S. Corrosion protection performance of microsilica added concretes in NaCl and seawater environments. **Construction and Building Materials**, v.13, p.213-219, 1999.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 17, p.147-152, 2003.

ATIS, C. D. Carbonation-Porosity-Strength model for fly ash concrete (Technical Note). **Journal of Materials in Civil Engineering**. Jan-Fev 2004, p.91-94, 2004.

BAI, Y., DARCY, F. P. BASHEER, A. M. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, n. 19, p. 691-697, 2005.

BANDALA, M. E. E.; QUERO, J. V.; COCA, O. F. J.; LIZARRAGA, L. G. M.; ZAMORA, B. M. A.; ORTIZ, A. C.; ALMERAYA, F. C.; ZAMBRANO, P. R.; TIBURCIO, C. G. Electrochemical characterization of modified concretes with sugar cane bagasse ash. **International Journal of Electrochemical Science**, n. 6, p. 4915-4926, 2011.

BAUER, E.; HELENE, P. R. L. Investigação comparativa da influência da escória de alto-forno na corrosão das armaduras. In: International Congress on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. **Anais...** Florianópolis. 1996.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção**. 1ª ed., São Paulo: Oficina de Textos, 414 p., 2010.

BESSA, S. A. L. **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. 2011. 181f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

BEZERRA, I. M. T.; SOUZA, J.; CARVALHO, J. B. Q.; NEVES, G. A. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011.

BNDES; CGEE; FAO; CEPAL. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Resumo Executivo, 32 p., 2008.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. **Lei nº 12.305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e propagação da corrosão do aço induzida por cloretos**. 2000. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

CALÇADA, L. M. L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto**. 2004. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

CALVINO, E. M. The Jewiest method for the identification of sugarcane varieties. **International Sugar Journal**, Bucks, v. 27, p. 22-24, 1925.

CANA. Melhoramento genético e biotecnologia, 5º Workshop Tecnológico sobre Melhoramento genético e biotecnologia, **Termo de referência**, Cordeirópolis, 2007. Disponível em: <[http://www.apta.sp.gov.br/cana/ver\\_work.php?work\\_id=47](http://www.apta.sp.gov.br/cana/ver_work.php?work_id=47)>. Acesso em: 18 fev 2010.

CANASAT-INPE. **Mapa do cultivo da cana-de-açúcar no Centro-sul: Safra 2009/2010**, Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. Disponível em: <<http://150.163.3.3/canasat/>>. Acesso em: 19 fev 2010.

CARVAJAL, A. M. Effect of accelerated carbonation on concretes of different types of cement. HPC, 4. **Proceedings...** Olinda, 2005.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 3 ed. São Carlos: EDUFSCar, 2007, 367p.

CASCUDO, O. M. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1964. 237 p. São Paulo: PINI, 1997.

CAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. R. L. Estimativa e determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto. In: Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto, **Anais...** Porto Alegre, 1993.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. **Melhoramento da cana-de-açúcar**, 1 ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004, 307 p.

CEZAR, D. S. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143f. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CHALEE, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. **Marine Structures**, n. 22, p. 341-353, 2009.

CHANG, J. J.; YEIH, W.; HUANG, R.; CHI, J. M. Mechanical properties of carbonated concrete. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, Taiwan, v. 26, n. 4, p. 513-522, 2003.

CHI, M. C. Effects of sugarcane bagasse ash as a cement replacement on properties of mortars. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 19, n. 3, p. 279-285, 2012.

CHINDAPRASIRT, P.; CHOTITHANORM, C.; CAO, H. T.; SIRIVIVATNANON, V. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. **Construction and Building Materials**, n. 21, p. 356-361, 2007.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S.; SIRIVIVATNANON, V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk and fly ash. **Construction and Building Materials**, n. 22, p. 932-938, 2008.

CHOI, Y.; KIM, J.; LEE, K. Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete. **Corrosion Science**, n.48, p. 1733-1745. 2006.

CINCOTTO, M.A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: **Tecnologia de Edificações**. São Paulo, Pini/ IPT, 1988 p.71-74.

COELHO, J. A.; BATALIONE, G. Avaliação do comportamento de argamassas de assentamento e de revestimento externo produzida com a adição de filito. In: 4º Seminário de Iniciação Científica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. **Anais...** Inhaúmas: IFGO, 2010.

COELHO, M. A. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002, 180f.

COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa: Um modelo para o Estado de SP**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999, 200 p.

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Primeiro levantamento da safra 2012/2013. Abr/2012. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12\\_04\\_10\\_09\\_19\\_04\\_boletim\\_de\\_cana.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_04_10_09_19_04_boletim_de_cana.pdf)>. Acesso em: 31 jul 2012.

CORDEIRO, G. C. Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana de açúcar com cimento Portland e cal. 2005. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...** Olinda: IBRACON. 2005.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. R. M. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, n. 30, p. 410-418, 2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. R. M. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement & Concrete Research**, n. 39, p. 110-115, 2009.

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, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2006.

CORRÊA, P. M. **Dicionário das plantas no Brasil**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1926. v.1, cap. 13.

COSTA, C. Primeiras canas e primeiros açúcares no Brasil. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.3, p. 160-168, 1958.

CYR M.; LUDMANN, C. Low risk meat and bone meal (MBM) bottom ash in mortars as sand replacement. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 469-480, 2006.

EMBRAPA Agropecuária. **Experimentos em cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.cnptia.embrapa.br/projetos/ipi/ipi/homepage/cana.html>>. Acesso em: 27 Out. 2007.

ESTADÃO, Tecnologia reduz resíduo do etanol, **O Estado de S. Paulo** / Herton Escobar. [23/04/2009]. Disponível em: <[http://www.estadao.com.br/estadaodehoje/20090423/not\\_imp359010,0.php](http://www.estadao.com.br/estadaodehoje/20090423/not_imp359010,0.php)>. Acesso em: 11 fev 2010.

FAPESP. **Bagaço de cana, resíduo cada vez mais lucrativo**. BV-CDI FAPESP na mídia. Publicado em: O Estado de S. Paulo (Agrícola) / Tânia Rabello [e] Fernanda Yoneya,

[03/09/2008]. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/namidia/noticia/25240/bagaco-cana-residuo-vez-lucrativo/>>. Acesso em 11 fev. 2010.

FARIA, K . C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 7-12, 2012.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)**, São Paulo: FIESP/CIESP, 2001, 90 p.

FRANCY, O.; FRANÇOIS, R. Measuring chloride diffusion coefficients from nonsteady state diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 28, nº 7, p. 947-953, 1998.

FREIRE, W. J. Materiais alternativos de construção. In: **Tecnologias e materiais alternativos de construção** / W. J. Freire, A. L. Beraldo (coord.) – Campinas: Ed. UNICAMP, 2003.

FREITAS, E. G. A. **Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana para uso em construção civil**. 1996. 196f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1996.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, n. 6, p. 515-524, 2007.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; SACIOTO, A. P.; MISSAU, F.; HOPPE, T. F. Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: a technical and economical feasibility study. **Cement and Concrete Composites**, n. 32, p. 783-793, 2010.

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

GOMES, N. S. **Influência de ativadores químicos e de adições minerais no comportamento de concretos frente a cloretos**. 2003. 182p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GU, P.; BEAUDOIN, J. J.; ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. Performance of reinforcement steel in concrete containing silica fume and blast-furnace slag ponded with sodium chloride solution. **ACI Materials Journal**, v.97, n.3, p.254-262, 2000.

GU, P.; BEAUDOIN, J. J.; ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. Performance of steel reinforcement in Portland cement and high-volume fly ash concretes exposed to chloride solution. **ACI Materials Journal**, v.96, n.5, p.551-558, 1999.

HANSSON, C. M. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 14, n. 4, p. 574-584, 1984.

HELENE, P. R. L. Vida Útil das Estruturas. **Téchne**, n. 17, p. 28-31, jul./ago. 1995.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 1993.

HERNÁNDEZ, J. F. M.; Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reactions. **Cement and Concrete Research**. vol. 28, p. 1525-1536. 1998.

HERRERA, M. Cane, sugar and the environment. **Proceedings of the Cuba/FAO International Sugar Conference**. Havana, Cuba. 7-9 December 1999. 2000.

HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4a ed., London: Elsevier, 2003.

HIGASHIYAMA, H.; YAGISHITA, F.; SANO, M.; TAKAHASHI, O. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, n. 26, p. 96-101, 2012.

HOPPE, A. E.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. C.; CERVO, G. C.; ZERBINO, R.; SENSALÉ, G. R.; PEREIRA, R. Q. Avaliação de carbonatação de concreto com a cinza de casca de arroz natural, sem moagem. In: 49o Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. **Anais do 49º CBC**. São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

HORSAKULTHAI, V.; PHIUVANNA, S.; KAENBUD, W. Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 54-60, 2011.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, **Energia produzida a partir do bagaço da cana é economicamente viável**. / Rodrigo Martins. [10/08/2009]. Disponível em: <[www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energia-produzida-partir-bagaco-cana-economicamente-viavel](http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energia-produzida-partir-bagaco-cana-economicamente-viavel)>. Acesso em: 15 fev 2010.

ISMAIL, M. E.; SOLEYMANI, H. R. Monitoring corrosion rate for ordinary Portland concrete (OPC) and high-performance concrete (HPC) specimens subjected to chloride attack. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, p. 863-874, 2002.

JENDIROBA, E. Aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. In: **Gestão de resíduos na agricultura e na agroindústria**. / editores Cláudio Spadotto e Wagner Ribeiro - Botucatu, FEPAF, 2006.

JENSEN, O.M.; HANSEN, P.F.; COATS, A.M.; GLASSER, F.P. Chloride ingress in cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, v.29, p.1497-1504, 1999.

JOHN, V. M. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: **Tecnologias e materiais alternativos de construção** / W. J. Freire, A. L. Beraldo (coord.) – Campinas: Ed. UNICAMP, 2003.

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. [s.d.] Disponível em: <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des\\_sustentavel.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm)>. Acessado em 22 Jun. 07.

JOHN, V. M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: II Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. 1999. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1999, p. 44-55.

JOHN, V. M.. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Workshop – Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção. São Paulo, 1996. **Anais...** São Paulo: ANTAC. PCC-USP, 1996.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos agroindustriais para uso na construção civil no Brasil. In: Reciclagem na Construção Civil, alternativa econômica para proteção ambiental. **Anais...** São Paulo, 1997. p. 67-76.

JORNAL DA CIÊNCIA. **Trabalho no corte de cana tem dias contados**. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência – SBPC. Disponível em: <<http://www.jornaldaciencia.org.br/Detalhe.jsp?id=50416>>. Acessado em 6 Nov. 07.

JOUKOSKI, A. **Estudo do desempenho de concretos para artefatos de redes de distribuição de energia elétrica destinadas a ambientes litorâneos**. 2003, 242p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

KANTRO, D. L. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste – A Miniature Slump Test. **Cement Concrete and Aggregates**, v.2, n.2, p.95-102, 1980.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 744-753, 2006.

KIM, M. Y.; YANG, E. I.; YI, S. T. Evaluation of chloride penetration characteristics using a colorimetric method in concrete structures. In: SMiRT Structural Mechanics in Reactor Technology, 19. **Transactions...** Toronto: IASMiRT, 2007.

KREUZ, A. L.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. Estudo das propriedades dos concretos utilizando cinza pesada como parte da areia. In: ENTAC – 2002 – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10. **Anais...** 2002.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. São Carlos, 246p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v. 11, n.2, p. 201-212, 2011.

LIMA, S. A.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; SANTOS, T. J. Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo. **Revista Tecnológica (UEM)**, v. 18, p. 87-97, 2009.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de agregados para a construção civil**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MACEDO, I. C. The current situation and prospects for ethanol. **Estudos avançados**, vol.21, n. 59, p. 157-165, 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/en\\_a11v2159.pdf](http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/en_a11v2159.pdf)> Acesso em: 18 fev 2010.

MADURWAR, M. V.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Application of agro-waste for sustainable construction materials: a review. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 872-878, 2013.

MANHÃES, M. S. Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria. In: Tecnologia canavieira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo – **Boletim Técnico** n. 12, Campos dos Goytacazes: UFRRJ, pp. 24-31. 1999.

MARTINS, C. H.; MACHADO, P. H. T. Uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo em argamassas. In: 7º Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. **Anais...** Maringá: UEM, 2009.

MARTINS, C. H.; ZANELLA, R. M. Avaliação da absorção por capilaridade em argamassas produzidas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Curitiba: IBRACON, 2009.

MARTINS, C. H.; ZANELLA, R. M.; PAULINO Jr, R. Potencial do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo. In: I Seminário de Engenharia Urbana – SEUEM, 2007. **Anais...** Maringá: UEM, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINDAT. **Quartz-beta**. Disponível em: <<http://www.mindat.org/min-7395.html>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

MIRANDA, L. F. R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduo Classe A da construção civil**. Edição Revisada. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo, 2005. 439p.

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; GONÇALVES, J. P.; LIMA, P. R. L.; BOAVENTURA, M. C. Avaliação de desempenho, quanto à carbonatação, de concretos produzidos com resíduos de construção e demolição. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. **Anais do 49º CBC**. São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

NARITOMI, J. **Herança colonial, instituições e desenvolvimento: um estudo sobre a desigualdade entre os municípios brasileiros**. 2007. 100f. Dissertação (Mestrado em

Economia) – Departamento de Economia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

NEHDI, M. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**. Vol. 33, p. 1203-1210. 2003.

OIKONOMOU, N.; MAVRIDOU, S. Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires. **Cement and Concrete Composites**, n. 31, p. 403-407, 2009.

OLIVEIRA, M. P., TINOCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SARAZ, J. A. O. Sugarcane bagasse ash as a partial Portland cement replacement material. **Dyna**, v. 77, n. 163, p. 47-54, 2010.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; SOCCOL, V. T. Biotechnological potential of agro-industrial residues: sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, n. 74, p. 69-80, 2000.

PAULA, M. O.; TINOCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

PAULETTI, C; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 7-20, out/dez 2007.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAZ-PNZÓN, L.; ORDOÑEZ, L. M. Sugarcane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, n 77, p. 321- 325, 2002.

PEKMEZCI, B. Y.; AKYÜZ, S. Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**. Vol. 34, p.2175-2179. 2004.

PEREIRA, J. A. R. Saneamento áreas urbanas. In: **Saneamento ambiental em áreas urbanas**. Organizado por José Almir Rodrigues Pereira. – Belém : UFPA/NUMA, EDUFPA, 2003. p. 23-37.

PHILIPPI JR, A; AGUIAR, A. O. Resíduos sólidos: características e gerenciamento. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** / Arlindo Philippi Júnior, editor. – Barueri: Manole, 2005.

PINIWEB. **Vergalhões de aço.** [11 set 2003] Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/vergalhoes-de-aco-80129-1.asp>>. Acesso em: 28 nov 2012.

PONTE, H. A. **Fundamentos da corrosão.** Notas de aula: Eletroquímica Aplicada e Corrosão. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

PRÓ-ÁLCOOL. **Programa Brasileiro do Álcool.** Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm>>. Acesso em: 05 fev 2009.

PRUDÊNCIO JR. Cinza da casca de arroz. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**, Coleção Habitare, v.4, Porto Alegre: ANTAC, 2003.

RAJAMANE, N. P.; Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 218-223, 2007.

RAMALHO, J. F. G. P.; SOBRINHO, N. M. B.A. Metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso de resíduos agroindustriais. **Floresta e Meio Ambiente**. v. 8, n. 1, p.120 - 129, jan./dez. 2001.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Ponto de ebulição** - Ação articulada entre governo, setores de produção e de pesquisa projeta Piracicaba no mercado mundial do etanol. Edição Impressa, Out 2007.

RIBEIRO, D. V. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado.** 2010. 260f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2010.

RILEM Concrete Permanent Comittee . RILEM Draft Recommendation - Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18. **Materials and Structures**, v.17, n. 102, 1984, p. 435-440.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** / Editores Janaíde Cavalcante Rocha [e] Vanderley Moacyr John. - Porto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitare, v.4).

ROSA, D. W. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. 2005. 149f. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v.30, n.6, p. 1114-1122, 2010.

SALOMÃO, M. C. F.; SILVA, T. J. Ensaio acelerado de carbonatação do concreto. In: Seminário de Iniciação Científica, 12. 2008, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2008.

SARMENTO, M. F.; VANDERLEI, R. D. Estudo da durabilidade de concreto contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar. In: VIII Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura, 2011, Maringá. Anais do VIII ENTECA. Maringá: UEM, 2011.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. 178f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

SCA ETANOL DO BRASIL. **Dados de produção**. Disponível em: <[http://www.scalcool.com.br/portugues/dados\\_de\\_producao.asp](http://www.scalcool.com.br/portugues/dados_de_producao.asp)>. Acesso em: 31 jul. 2012.

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

SHI, X.; YANG, Z.; LIU, Y.; CROSS, D. Strength and corrosion properties of Portland cement mortar and concrete with mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3245-3256, 2011.

SIAMIG. **Mitos e verdades sobre cana-de-açúcar**. Cartilha, Belo Horizonte: AAIA / SIAMIG / SINDAÇUCAR-MG. Disponível em: <[http://www.siamig.org.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=288&Itemid=56](http://www.siamig.org.br/index.php?option=com_content&task=view&id=288&Itemid=56)>. Acesso em: 31 jul 2012.

SILVA, E. P. **Avaliação do potencial de corrosão de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, submetido a ensaio de corrosão acelerado.** 2010. Monografia. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** 2006. Tese (Doutorado). Interunidades Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SIMAS, M. S. L. **Sistemas de protecção do betão face à carbonatação.** 2007, 111f. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2007.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management**, n. 31, 2352-2360, 2011.

SOARES, M. M. N.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. S.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar contaminada com quartzo proveniente da lavoura. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais do 20º CBECIMAT.** Joinville: CBECIMAT, 2012.

SOUTO, J. M. F.; VANDERLEI, R. D.; NUNES, I. H. S. Avaliação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial de cimento Portland na produção de concretos. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais do 51º CBC.** Curitiba: IBRACON, 2009.

SOUZA G. N. FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. **Anais do 49º CBC.** São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 10, p. 2774-2780, 2011.

SPADOTTO, C. A. **Gestão de Resíduos: realizações e desafios no setor sucroalcooleiro.** EMBRAPA Meio Ambiente, 2007. Disponível em: <[http://www.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/360.pdf](http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/360.pdf)>. Acesso em: 11 fev 2010.

SWAMY, R. N.; SURYAVANSHI, A. K.; TANIKAWA, S. Protective ability of an acrylic-based surface coating system against chloride and carbonation penetration into concrete. **ACI Materials Journal**, v.95, n.2, p.101-112, 1999.

TOKUDOME, N. **Carbonatação do concreto**. Cimento Itambé, 2009. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/carbonatacao-do-concreto/>>. Acesso em: 02 fev. 2010.

TORRES, A. S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado**. 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

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

UNICA. **Biomassa pouco aproveitada** / Luiz Gonzaga Bertelli (convidado), União da Indústria de Cana-de-açúcar. [2004]. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/opiniaio/show.asp?msgCode=%7B82ABCB59-E737-4E60-ACE0-E46AA24F8EA3%7D>>. Acesso em: 11 fev 2010.

UNICA. **Produção e uso do Etanol combustível no Brasil: Respostas às questões mais frequentes** / Eduardo Pereira de Carvalho (presidente), São Paulo: União da Indústria de Cana-de-açúcar, 2007, 70p.

UNICA. **Setor Sucroenergético – Histórico: Cultivo da cana hoje**. União da Indústria de Cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=9E97665F-3A81-46F2-BF69-26E00C323988>>. Acesso em: 02 mar 2010.

VALENCIANO, M. D. C. M.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**. v. 24, n. 3, Jaboticabal. 2004.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casa de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 77-90, 2010.

VOLPATO, G. L.; BARRETO, R. E. **Estatística sem dor!** 1ª ed., Botucatu: Best Writing, 2011.

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco**. 2010. 241f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

YAZICI, H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, n. 22, p. 456-462, 2008.

YOUNSI, A.; TURCRY, P.; ROZIERE, P.; AIT-MOKHTAR, A.; LOUKILI, A. Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. **Cement & Concrete Composites**, v.33, p. 993-1000, 2011.

ZARDO, A. M; BEZZERA, E. M; MARTELLO, L. S; SAVASTANO JR, H. Utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, **Anais...**, São Paulo, Brasil.

ZHANG, M. H.; LASTRA, R. MALHOTRA, V. M. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and microstructure of the interfacial zone between the aggregate and the paste. **Cement and Concrete Research**. v. 26, p. 963-977. 1996.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Campinas, 1997. 156p.

# APÊNDICE

A seguir, foram apresentadas as Tabelas A.1 a A.9 referentes às medições de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) do ensaio acelerado dos corpos de prova de concreto (CR, C30 e C50). Os dados constantes nestas tabelas foram obtidos a partir da metodologia descrita no item 4.2.13 e discutidos no item 5.9.

Para cada traço foram medidos três corpos de prova, conforme relação:

- Tabela A.1 – Medidas Ecorr – CR-1
- Tabela A.2 – Medidas Ecorr – CR-2
- Tabela A.3 – Medidas Ecorr – CR-3
- Tabela A.4 – Medidas Ecorr – C30-1
- Tabela A.5 – Medidas Ecorr – C30-2
- Tabela A.6 – Medidas Ecorr – C30-3
- Tabela A.7 – Medidas Ecorr – C50-1
- Tabela A.8 – Medidas Ecorr – C50-2
- Tabela A.9 – Medidas Ecorr – C50-3

Tabela A.1 – Medidas Ecorr - CR-1

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-329,9	937,2	05/05/2012	-128,3	906,6
	B - Branco	água comum	-487,0			-129,2	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-93,2	931,5	12/06/2012	-161,4	905,0
	B - Branco		-91,4			-156,5	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-90,3	930,1	19/06/2012	-163,8	906,2
	B - Branco		-81,3			-154,7	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-82,0	933,6	26/06/2012	-176,5	904,9
	B - Branco		-70,7			-166,7	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-72,9	933,4	03/07/2012	-173,9	906,5
	B - Branco		-62,8			-164,6	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-71,6	934,2	10/07/2012	-150,8	906,6
	B - Branco		-63,8			-140,2	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-63,4	937,0	17/07/2012	-170,8	907,7
	B - Branco		-50,6			-157,6	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-57,3	937,7	24/07/2012	-158,7	910,5
	B - Branco		-46,2			-147,5	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-62,3	938,1	31/07/2012	-152,8	911,5
	B - Branco		-50,4			-141,4	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-57,5	938,3	07/08/2012	-148,1	912,5
	B - Branco		-45,3			-137,6	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-416,0	939,1	14/08/2012	-382,4	913,9
	B - Branco		-45,9			-109,9	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-483,0	939,5	21/08/2012	-397,0	914,2
	B - Branco		-38,6			-132,6	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-509,0	939,7	28/08/2012	-406,0	915,2
	B - Branco		-38,4			-129,4	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-478,0	939,7	04/09/2012	-362,8	915,5
	B - Branco		-36,2			-124,3	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-508,0	940,1	11/09/2012	-400,0	915,9
	B - Branco		-539,0			-435,0	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-506,0	940,0	18/09/2012	-412,0	918,4
	B - Branco		-610,0			-450,0	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-482,0	940,5	25/09/2012	-365,9	918,1
	B - Branco		-575,0			-466,0	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-417,0	940,8	02/10/2012	-343,8	918,6
	B - Branco		-541,0			-444,0	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-431,0	940,5	09/10/2012	-360,0	917,4
	B - Branco		-558,0			-437,0	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-446,0	940,8	16/10/2012	-378,9	917,2
	B - Branco		-569,0			-419,0	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-457,0	940,8	23/10/2012	-368,1	918,1
	B - Branco		-565,0			-424,0	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-469,0	941,1	30/10/2012	-309,9	918,3
	B - Branco		-545,0			-396,8	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-466,0	941,0	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-510,0			-	

Tabela A.2 – Medidas Ecorr - CR-2

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-487,0	920,9	05/05/2012	-123,5	889,9
	B - Branco	água comum	-112,5			-130,9	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-95,6	915,8	12/06/2012	-154,6	888,8
	B - Branco		-90,8			-163,8	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-85,7	916,2	19/06/2012	-156,9	890,5
	B - Branco		-83,5			-161,4	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-77,2	917,3	26/06/2012	-168,3	888,6
	B - Branco		-75,6			-174,2	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-67,8	917,0	03/07/2012	-164,7	890,4
	B - Branco		-66,7			-171,7	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-66,7	918,2	10/07/2012	-142,4	890,3
	B - Branco		-64,7			-147,6	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-59,4	920,3	17/07/2012	-154,7	891,9
	B - Branco		-58,5			-163,6	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-52,1	920,9	24/07/2012	-145,4	894,4
	B - Branco		-52,2			-151,2	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-57,2	921,4	31/07/2012	-142,0	895,5
	B - Branco		-57,4			-148,4	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-44,3	921,8	07/08/2012	-397,0	896,3
	B - Branco		-51,6			-145,5	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-427,0	922,4	14/08/2012	-387,9	897,7
	B - Branco		-51,0			-119,3	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-498,0	922,7	21/08/2012	-415,0	898,1
	B - Branco		-49,0			-134,3	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-502,0	922,9	28/08/2012	-423,0	898,7
	B - Branco		-46,3			-133,5	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-521,0	922,8	04/09/2012	-408,0	899,3
	B - Branco		-413,0			-402,0	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-549,0	923,3	11/09/2012	-408,0	899,8
	B - Branco		-471,0			-378,3	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-555,0	923,2	18/09/2012	-397,7	902,1
	B - Branco		-439,0			-423,0	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-516,0	923,9	25/09/2012	-410,0	902,1
	B - Branco		-462,0			-418,0	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-501,0	924,0	02/10/2012	-396,0	902,5
	B - Branco		-432,0			-405,0	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-500,0	923,9	09/10/2012	-354,9	901,3
	B - Branco		-439,0			-374,3	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-486,0	924,1	16/10/2012	-356,6	900,9
	B - Branco		-382,2			-345,8	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-508,0	924,3	23/10/2012	-408,0	901,9
	B - Branco		-392,4			-397,1	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-516,0	924,6	30/10/2012	-366,9	902,2
	B - Branco		-444,0			-317,6	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-515,0	924,4	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-461,0			-	

Tabela A.3 – Medidas Ecorr - CR-3

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012 água comum	-497,0	927,8	05/05/2012	-119,4	897,2
	B - Branco		-17,2			-113,0	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-98,1	922,1	12/06/2012	-144,8	896,2
	B - Branco		-81,0			-138,0	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-87,9	922,4	19/06/2012	-147,5	897,3
	B - Branco		-75,2			-137,1	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-78,4	923,5	26/06/2012	-155,5	895,3
	B - Branco		-77,2			-148,1	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-69,6	924,5	03/07/2012	-154,8	897,3
	B - Branco		-58,2			-150,8	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-67,9	925,2	10/07/2012	-132,4	897,5
	B - Branco		-58,3			-123,8	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-61,7	927,0	17/07/2012	-144,8	898,9
	B - Branco		-52,5			-137,0	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-54,0	927,4	24/07/2012	-137,0	901,9
	B - Branco		-45,5			-129,6	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-57,3	928,0	31/07/2012	-131,4	902,8
	B - Branco		-48,8			-123,6	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-50,5	928,3	07/08/2012	-127,5	903,7
	B - Branco		-41,3			-120,4	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-400,0	929,1	14/08/2012	-394,4	904,7
	B - Branco		-42,2			-96,6	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-427,0	929,4	21/08/2012	-402,0	905,3
	B - Branco		-38,7			-115,8	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-465,0	929,5	28/08/2012	-404,0	906,1
	B - Branco		-37,7			-112,5	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-473,0	929,4	04/09/2012	-425,0	906,4
	B - Branco		-433,0			-353,3	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-520,0	929,8	11/09/2012	-444,0	907,0
	B - Branco		-379,2			-261,6	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-530,0	929,8	18/09/2012	-475,0	909,2
	B - Branco		-337,6			-263,1	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-527,0	930,6	25/09/2012	-479,0	909,2
	B - Branco		-314,0			-248,7	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-530,0	930,5	02/10/2012	-465,0	909,8
	B - Branco		-285,4			-232,3	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-520,0	930,5	09/10/2012	-424,0	908,7
	B - Branco		-268,8			-213,9	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-497,0	930,6	16/10/2012	-416,0	908,5
	B - Branco		-241,9			-352,5	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-513,0	930,8	23/10/2012	-417,0	909,1
	B - Branco		-493,0			-458,0	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-529,0	931,1	30/10/2012	-395,7	909,5
	B - Branco		-523,0			-455,0	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-529,0	931,1	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-515,0			-	

Tabela A.4 – Medidas Ecorr – C30-1

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-483,0	934,0	05/05/2012	-183,4	904,0
	B - Branco	água comum	-380,8			-171,8	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-138,5	928,5	12/06/2012	-154,7	901,0
	B - Branco		-138,2			-158,6	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-95,9	926,9	19/06/2012	-155,7	903,5
	B - Branco		-88,9			-159,0	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-80,2	928,3	26/06/2012	-161,8	900,7
	B - Branco		-78,5			-164,2	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-68,2	929,1	03/07/2012	-152,6	901,9
	B - Branco		-66,4			-154,2	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-63,3	930,3	10/07/2012	-132,5	902,7
	B - Branco		-61,7			-131,5	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-58,6	932,3	17/07/2012	-145,5	902,8
	B - Branco		-55,4			-146,2	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-51,7	933,2	24/07/2012	-134,7	905,8
	B - Branco		-48,6			-133,8	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-55,0	934,0	31/07/2012	-127,2	907,2
	B - Branco		-51,0			-125,5	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-48,6	934,8	07/08/2012	-127,9	908,4
	B - Branco		-44,7			-126,2	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-48,5	935,2	14/08/2012	-105,7	909,6
	B - Branco		-44,9			-103,8	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-44,3	935,6	21/08/2012	-121,4	910,2
	B - Branco		-40,9			-120,9	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-41,8	935,9	28/08/2012	-119,4	910,9
	B - Branco		-40,5			-119,2	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-40,3	936,0	04/09/2012	-114,3	911,2
	B - Branco		-37,3			-113,8	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-455,0	936,3	11/09/2012	-404,0	911,7
	B - Branco		-42,4			-115,5	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-450,0	936,4	18/09/2012	-404,0	913,8
	B - Branco		-44,7			-104,4	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-468,0	937,1	25/09/2012	-412,0	913,8
	B - Branco		-43,4			-106,3	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-447,0	937,4	02/10/2012	-411,0	914,3
	B - Branco		-442,0			-434,0	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-458,0	937,1	09/10/2012	-369,2	913,2
	B - Branco		-484,0			-408,0	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-461,0	937,4	16/10/2012	-390,7	912,5
	B - Branco		-484,0			-408,0	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-491,0	937,5	23/10/2012	-398,0	913,3
	B - Branco		-499,0			-394,3	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-478,0	937,6	30/10/2012	-406,0	913,8
	B - Branco		-494,0			-390,5	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-491,0	937,9	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-516,0			-	

Tabela A.5 – Medidas Ecorr – C30-2

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-509,0	925,9	05/05/2012	-132,5	894,3
	B - Branco	água comum	-483,0			-206,8	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-109,8	919,2	12/06/2012	-162,7	892,7
	B - Branco		-125,2			-165,1	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-98,0	919,3	19/06/2012	-158,9	894,2
	B - Branco		-100,7			-157,6	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-84,2	920,5	26/06/2012	-166,4	892,8
	B - Branco		-75,1			-160,1	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-75,5	921,1	03/07/2012	-159,7	894,1
	B - Branco		-60,5			-154,4	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-72,2	921,7	10/07/2012	-143,5	894,3
	B - Branco		-53,7			-127,5	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-67,7	924,4	17/07/2012	-151,0	895,4
	B - Branco		-46,2			-143,4	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-60,8	924,7	24/07/2012	-141,3	898,4
	B - Branco		-39,1			-130,2	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-63,1	925,8	31/07/2012	-132,7	899,9
	B - Branco		-44,2			-121,7	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-57,3	926,2	07/08/2012	-132,4	900,6
	B - Branco		-39,1			-122,0	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-56,7	926,8	14/08/2012	-112,4	902,0
	B - Branco		-38,9			-97,9	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-57,8	927,5	21/08/2012	-143,0	902,5
	B - Branco		-35,7			-114,8	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-51,0	927,8	28/08/2012	-366,4	903,4
	B - Branco		-33,8			-113,3	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-445,0	927,9	04/09/2012	-402,0	903,7
	B - Branco		-31,9			-105,8	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-431,0	928,4	11/09/2012	-380,9	904,5
	B - Branco		-153,9			-112,0	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-461,0	928,2	18/09/2012	-396,0	906,5
	B - Branco		-38,5			-97,5	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-456,0	929,1	25/09/2012	-374,5	906,7
	B - Branco		-40,9			-99,6	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-415,0	928,9	02/10/2012	-338,1	907,2
	B - Branco		-335,6			-408,0	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-420,0	928,9	09/10/2012	-304,9	906,1
	B - Branco		-416,0			-397,5	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-440,0	929,3	16/10/2012	-283,5	905,3
	B - Branco		-435,0			-451,0	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-440,0	929,7	23/10/2012	-335,3	906,4
	B - Branco		-462,0			-436,0	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-456,0	929,7	30/10/2012	-347,4	906,9
	B - Branco		-486,0			-436,0	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-490,0	929,9	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-500,0			-	

Tabela A.6 – Medidas Ecorr – C30-3

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-487,0	947,3	05/05/2012	-130,1	915,6
	B - Branco	água comum	-313,5			-116,1	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-123,2	940,8	12/06/2012	-147,4	914,7
	B - Branco		-112,2			-149,7	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-87,3	940,6	19/06/2012	-146,1	915,8
	B - Branco		-87,9			-150,7	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-69,5	941,5	26/06/2012	-155,0	914,4
	B - Branco		-77,3			-162,9	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-57,7	942,2	03/07/2012	-143,1	916,0
	B - Branco		-69,8			-155,4	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-52,3	943,4	10/07/2012	-121,8	916,0
	B - Branco		-67,5			-136,9	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-46,6	945,5	17/07/2012	-138,4	917,1
	B - Branco		-63,9			-152,7	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-39,3	945,6	24/07/2012	-125,8	920,2
	B - Branco		-58,2			-143,2	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-42,0	946,8	31/07/2012	-115,4	921,3
	B - Branco		-61,5			-132,8	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-36,4	947,7	07/08/2012	-116,3	922,3
	B - Branco		-55,4			-132,8	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-37,5	947,9	14/08/2012	-94,6	923,6
	B - Branco		-55,0			-113,4	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-34,5	948,6	21/08/2012	-113,7	924,3
	B - Branco		-51,5			-130,6	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-32,5	949,0	28/08/2012	-108,9	924,9
	B - Branco		-49,0			-123,8	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-30,0	949,0	04/09/2012	-104,0	925,4
	B - Branco		-46,7			-122,6	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-34,1	949,2	11/09/2012	-106,2	926,1
	B - Branco		-51,5			-125,3	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-35,2	949,4	18/09/2012	-92,3	928,1
	B - Branco		-52,9			-111,3	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-35,1	950,2	25/09/2012	-105,8	928,2
	B - Branco		-51,6			-112,3	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-31,2	950,0	02/10/2012	-92,4	928,6
	B - Branco		-36,7			-104,9	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-56,1	950,2	09/10/2012	-397,5	927,6
	B - Branco		-61,4			-113,0	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-456,0	950,6	16/10/2012	-388,3	926,8
	B - Branco		-382,5			-406,0	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-474,0	950,8	23/10/2012	-385,4	927,9
	B - Branco		-499,0			-414,0	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-478,0	951,0	30/10/2012	-338,5	928,2
	B - Branco		-517,0			-397,0	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-521,0	951,2	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-535,0			-	

Tabela A.7 – Medidas Ecorr – C50-1

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-344,1	928,8	05/05/2012	-115,1	900,7
	B - Branco	água comum	-433,0			-214,8	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-84,3	921,7	12/06/2012	-142,1	894,8
	B - Branco		-182,6			-215,6	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-68,6	923,1	19/06/2012	-137,0	896,1
	B - Branco		-155,6			-200,1	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-54,3	924,1	26/06/2012	-145,9	894,7
	B - Branco		-137,4			-184,8	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-45,9	925,3	03/07/2012	-140,8	895,8
	B - Branco		-90,7			-159,7	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-42,7	927,2	10/07/2012	-118,0	896,1
	B - Branco		-72,0			-129,6	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-38,0	927,7	17/07/2012	-133,1	897,4
	B - Branco		-62,8			-143,6	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-32,3	929,0	24/07/2012	-113,8	900,5
	B - Branco		-56,7			-129,2	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-34,6	930,0	31/07/2012	-107,1	901,8
	B - Branco		-60,8			-127,2	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-29,2	930,2	07/08/2012	-106,7	902,9
	B - Branco		-57,0			-127,9	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-30,0	931,1	14/08/2012	-86,0	904,2
	B - Branco		-57,3			-110,8	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-26,9	931,6	21/08/2012	-101,7	904,7
	B - Branco		-54,9			-126,7	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-24,1	932,0	28/08/2012	-94,7	905,3
	B - Branco		-54,6			-121,5	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-21,7	932,6	04/09/2012	-368,1	905,4
	B - Branco		-51,0			-120,8	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-496,0	932,7	11/09/2012	-366,2	906,0
	B - Branco		-55,9			-123,5	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-526,0	933,4	18/09/2012	-409,0	908,3
	B - Branco		-56,9			-107,6	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-582,0	933,6	25/09/2012	-412,0	908,3
	B - Branco		-56,8			-116,9	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-627,0	933,7	02/10/2012	-397,0	908,7
	B - Branco		-75,2			-105,2	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-649,0	933,8	09/10/2012	-386,2	907,1
	B - Branco		-462,0			-391,5	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-634,0	934,0	16/10/2012	-354,3	906,4
	B - Branco		-561,0			-345,9	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-603,0	934,2	23/10/2012	-354,3	907,4
	B - Branco		-560,0			-342,7	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-596,0	934,5	30/10/2012	-349,2	907,7
	B - Branco		-621,0			-311,2	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-593,0	923,1	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-584,0			-	

Tabela A.8 – Medidas Ecorr – C50-2

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-488,0	924,0	05/05/2012	-137,7	896,9
	B - Branco	água comum	-493,0			-128,1	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-156,2	918,9	12/06/2012	-154,4	891,2
	B - Branco		-111,7			-152,8	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-111,4	917,9	19/06/2012	-145,2	892,7
	B - Branco		-93,3			-140,4	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-82,4	919,3	26/06/2012	-154,1	891,4
	B - Branco		-73,4			-155,2	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-67,9	919,6	03/07/2012	-146,3	892,4
	B - Branco		-62,7			-147,9	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-59,6	920,5	10/07/2012	-123,8	892,2
	B - Branco		-59,2			-123,2	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-54,7	922,1	17/07/2012	-137,4	893,1
	B - Branco		-55,6			-139,4	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-49,6	922,9	24/07/2012	-123,9	896,2
	B - Branco		-50,4			-126,9	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-50,6	924,0	31/07/2012	-120,4	897,8
	B - Branco		-54,1			-122,6	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-46,0	924,7	07/08/2012	-116,3	898,6
	B - Branco		-49,0			-120,1	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-46,3	925,2	14/08/2012	-100,6	899,7
	B - Branco		-49,5			-100,6	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-43,5	926,0	21/08/2012	-114,6	900,2
	B - Branco		-80,3			-116,3	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-41,0	926,5	28/08/2012	-111,8	900,6
	B - Branco		-424,0			-376,6	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-39,8	927,0	04/09/2012	-104,2	901,1
	B - Branco		-443,0			-365,0	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-43,1	927,3	11/09/2012	-110,2	901,8
	B - Branco		-493,0			-347,0	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-450,0	927,6	18/09/2012	-387,5	903,9
	B - Branco		-577,0			-351,9	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-450,0	928,4	25/09/2012	-380,6	903,8
	B - Branco		-571,0			-350,9	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-525,0	928,4	02/10/2012	-390,2	904,4
	B - Branco		-562,0			-348,8	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-564,0	928,6	09/10/2012	-380,5	902,7
	B - Branco		-584,0			-355,5	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-578,0	928,9	16/10/2012	-369,2	902,0
	B - Branco		-602,0			-327,8	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-604,0	929,2	23/10/2012	-372,1	903,1
	B - Branco		-616,0			-306,7	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-633,0	929,5	30/10/2012	-336,4	903,3
	B - Branco		-597,0			-293,5	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-609,0	929,7	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-610,0			-	

Tabela A.9 – Medidas Ecorr – C50-3

Ciclo	Barra	Após imersão em solução NaCl			Após secagem em estufa à 50 °C		
		Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)	Data	E <sub>corr</sub> (mV)	Massa (g)
0	A - Amarelo	31/05/2012	-482,0	949,4	05/05/2012	-134,6	922,3
	B - Branco	água comum	-474,0			-119,2	
1	A - Amarelo	07/06/2012	-133,8	943,9	12/06/2012	-175,6	917,3
	B - Branco		-115,0			-155,2	
2	A - Amarelo	14/06/2012	-119,0	942,5	19/06/2012	-159,5	918,0
	B - Branco		-88,9			-143,1	
3	A - Amarelo	21/06/2012	-98,1	944,2	26/06/2012	-160,4	916,7
	B - Branco		-73,5			-154,6	
4	A - Amarelo	28/06/2012	-74,2	944,3	03/07/2012	-149,0	917,6
	B - Branco		-63,8			-149,6	
5	A - Amarelo	05/07/2012	-63,3	944,7	10/07/2012	-121,1	917,2
	B - Branco		-61,2			-123,9	
6	A - Amarelo	12/07/2012	-56,8	946,8	17/07/2012	-131,9	918,3
	B - Branco		-59,4			-138,4	
7	A - Amarelo	19/07/2012	-50,5	947,2	24/07/2012	-121,4	921,0
	B - Branco		-53,8			-128,0	
8	A - Amarelo	26/07/2012	-54,9	948,7	31/07/2012	-118,0	922,7
	B - Branco		-56,5			-122,2	
9	A - Amarelo	02/08/2012	-50,6	949,7	07/08/2012	-116,5	923,8
	B - Branco		-49,9			-120,6	
10	A - Amarelo	09/08/2012	-50,6	950,3	14/08/2012	-102,8	925,2
	B - Branco		-49,0			-105,0	
11	A - Amarelo	16/08/2012	-49,6	951,4	21/08/2012	-117,2	925,6
	B - Branco		-45,5			-118,9	
12	A - Amarelo	23/08/2012	-464,0	951,8	28/08/2012	-110,2	926,3
	B - Branco		-42,3			-112,2	
13	A - Amarelo	30/08/2012	-446,0	952,2	04/09/2012	-399,0	926,4
	B - Branco		-40,0			-270,6	
14	A - Amarelo	06/09/2012	-451,0	952,6	11/09/2012	-383,9	927,0
	B - Branco		-492,0			-406,0	
15	A - Amarelo	13/09/2012	-487,0	952,5	18/09/2012	-377,5	929,4
	B - Branco		-590,0			-413,0	
16	A - Amarelo	20/09/2012	-502,0	953,4	25/09/2012	-388,1	929,5
	B - Branco		-577,0			-403,0	
17	A - Amarelo	27/09/2012	-504,0	953,5	02/10/2012	-382,8	929,6
	B - Branco		-580,0			-399,0	
18	A - Amarelo	04/10/2012	-517,0	953,3	09/10/2012	-335,1	928,2
	B - Branco		-583,0			-376,0	
19	A - Amarelo	11/10/2012	-634,0	953,9	16/10/2012	-299,3	927,7
	B - Branco		-561,0			-363,5	
20	A - Amarelo	18/10/2012	-507,0	953,8	23/10/2012	-353,5	928,5
	B - Branco		-565,0			-372,6	
21	A - Amarelo	25/10/2012	-538,0	954,2	30/10/2012	-343,8	928,9
	B - Branco		-597,0			-342,6	
22	A - Amarelo	01/11/2012	-579,0	954,6	06/11/2012	-	-
	B - Branco		-604,0			-	