

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR  
COMO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETOS PARA ARTEFATOS  
DE INFRAESTRUTURA URBANA**

**SOFIA ARAÚJO LIMA BESSA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos

2011

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

B557uc

Bessa, Sofia Araújo Lima.

Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana / Sofia Araújo Lima Bessa. -- São Carlos : UFSCar, 2012.  
182 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Materiais de construção. 2. Concreto. 3. Cana-de-açúcar. 4. Infra-estrutura urbana. I. Título.

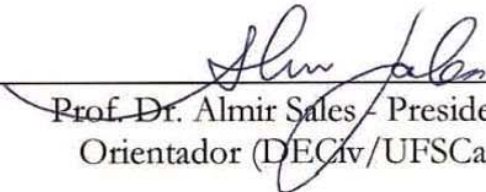
CDD: 691 (20ª)




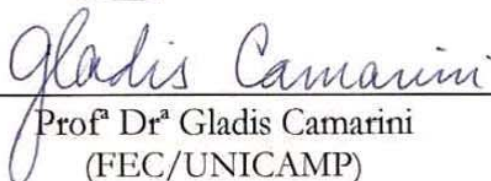
## FOLHA DE APROVAÇÃO

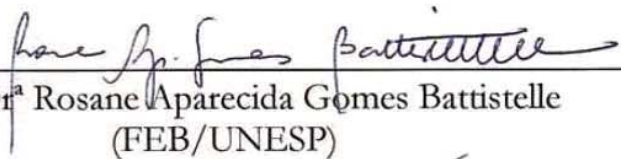
SOFIA ARAÚJO LIMA BESSA

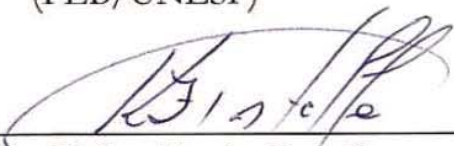
Tese defendida e aprovada em 16/12/2011  
pela Comissão Julgadora

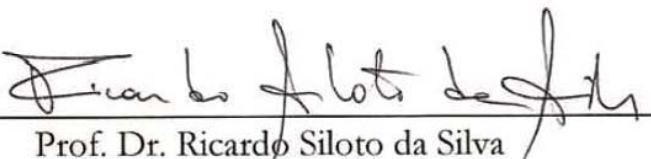
  
Prof. Dr. Almir Sales - Presidente  
Orientador (DECiv/UFSCar)

  
Prof. Dr. João Sergio Cordeiro  
(DECiv/UFSCar)

  
Profª Drª Gladis Camarini  
(FEC/UNICAMP)

  
Profª Drª Rosane Aparecida Gomes Battistelle  
(FEB/UNESP)

  
Prof. Dr. Kléber Franke Portella  
(LACTEC/UFPR)

  
Prof. Dr. Ricardo Siloto da Silva  
Presidente da CPGEU

Aos meus pais, Ângela e Edmilson (*in memoriam*).

Ao meu esposo Elievam.

Dedico.



# AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, e à Espiritualidade Maior pelo amparo de cada dia.

A toda minha família, que mesmo de longe, enviaram-me sempre mensagens de força e incentivo, em especial aos meus irmãos, Edmilson Filho e José Neto.

Às famílias Rocha e Bessa, em especial à Fátima Rocha, Elievan Bessa, Felipe e Juliana.

Ao prof. Almir Sales, pela orientação presente e pela amizade sincera; pelo incansável incentivo e pela confiança em mim depositada durante toda a elaboração deste trabalho.

Ao prof. Humberto Salazar de Amorim Varum, pela sua orientação e pela amizade durante o estágio de doutorado na Universidade de Aveiro, Portugal.

Aos professores Wilson Nunes dos Santos (UFSCar) e Kléber Franke Portella (UFPR) e ao amigo José Galvão (UTFPR) pelo auxílio durante os ensaios de durabilidade dos concretos.

Aos amigos do Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, pelo auxílio valioso no desenvolvimento experimental deste trabalho: Fernando Almeida, Juliana Moretti, Tiago Santos, Sérgio Cordeiro, Bruno Cerralio e Murilo Furquim.

Aos fiéis e amados amigos Gerlânia Baraúna, Sávio Pinheiro, Lídia Marília e Cíntia Bailey pela longa e sincera amizade. Não podia esquecer também dos amigos Helenice Sacht, Andréa Júlia, Tatiana Renata, André Cunha, Ana Elisa, Mário Pelissari, Gustavo Riente, Karla Rodrigues, Patrícia Nicoletti, Ariane Camargo, Geisa Gontijo e tantos outros, pela amizade são-carlense tão enriquecedora.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos e pelo auxílio financeiro a esta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estágio de doutorado.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, deixo registrado meus sinceros agradecimentos.



# RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro e exerce a liderança em todos os segmentos (cana-de-açúcar, açúcar e álcool). O resíduo constituído pelo bagaço da cana é gerado ao final do processo de moagem e é utilizado para a geração de energia por meio da queima em caldeiras. Ao final da queima, geralmente, as cinzas residuais do bagaço são lançadas no meio ambiente de forma inadequada. Nesse contexto, a indústria da Construção Civil é um setor no qual a incorporação dos vários tipos de resíduos apresenta-se como favorável, desde que consideradas as propriedades de aplicação dos materiais de construção. O interesse na realização desta pesquisa justificou-se pela necessidade de se avaliar a possibilidade do emprego da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em produtos para a construção, notadamente pelo grande volume de geração. Utilizados como matéria-prima, tais resíduos deixariam de ser causa primária de problemas ligados à saúde pública e ao meio ambiente. Como objetivo principal, esta pesquisa analisou a CBC como substituto do agregado miúdo em concretos e argamassas direcionados à produção de artefatos para a infraestrutura urbana. As amostras de CBC foram coletadas em usinas do estado de São Paulo e, caracterizadas por meio de ensaios físicos e químicos. A CBC foi utilizada em argamassas de cimento nos teores de 0%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100% de substituição. Após as análises mecânicas, os teores de 30% e 50% de CBC foram escolhidos para o estudo e produção dos concretos, que foram avaliados por meio de estudos de dosagem e de ensaios mecânicos e de durabilidade, além de estudos econômicos e ambientais do uso da CBC em substituição à areia. O artefato escolhido para análise foi a guia de concreto (dimensões 1,00 x 0,15 x 0,30 m) utilizada na drenagem e na pavimentação de vias. Em relação aos resultados obtidos, os concretos produzidos com a CBC e com o cimento CP II E 32 obtiveram os melhores resultados mecânicos em comparação com a série de referência. Em relação à durabilidade, pode-se afirmar que o uso da CBC como substituto parcial da areia não afetará a vida útil dos artefatos de concreto. Conclui-se, também, que apesar do uso da CBC não ter diminuído significativamente o valor final do m<sup>3</sup> do concreto, o ganho em relação ao desempenho mecânico foi maior. Pode-se concluir que as guias de pavimentação produzidas obtiveram resistência mecânica suficiente para serem desmoldadas, transportadas e acondicionadas antes do uso, da mesma forma que as guias pré-moldadas convencionais.

**Palavras-chave:** cana-de-açúcar, concretos, argamassas, durabilidade, viabilidade técnica.





# ABSTRACT

Brazil is the main sugarcane world-producer and it is the leader in all segments (sugarcane, sugar and alcohol). The waste consisting of sugarcane bagasse is produced at the end of grinding process and it is used to generate energy through burning in boilers. At the end of burning, the ashes of bagasse are often thrown into environment improperly. In this context, the Construction Industry is a sector in which the incorporation of a couple of wastes is propitious, whereas applications of construction materials properties are considered. This research is justified by the need of assess the possibility of use of sugarcane bagasse ash in construction products, especially given its large volume. Used like raw material, the waste would no longer be the primary cause of problems related to public health and the environment. The goal of this research was to analyze the sugarcane bagasse ash (SBA) as a substitute for fine aggregate in concretes and mortars directed to the production of artifacts for the urban infrastructure. The SBA samples were collected in sugar and alcohol mills in the state of São Paulo and, then, they were characterized by physical and chemical tests. The SBA was used in cement mortars with 0%, 10%, 20%, 30%, 50% and 100% substitution levels. After the mechanical tests, the 30% and 50% levels of SBA were chosen for the study and production of concretes, which were evaluated through dosage studies, mechanical and durability tests, and economical and environment studies for SBA like a substitution of sand. The artifact chosen for analysis was a concrete curb (dimensions 1,00 x 0,15 x 0,30 m) that was used for drainage and pavement of pathways. Regarding the results obtained, the concrete produced with the SBA and cement CP II E 32 (Group C) had the best mechanical results compared to their respective reference series. Regarding durability, it is possible to say that the use of ash as a partial replacement of sand does not affect the service life of concrete artifacts. It can be also concluded that despite the use of the SBA did not diminish significantly the final value of m<sup>3</sup> of concrete, the gain in relation to mechanical performance was higher. On the analysis of the artifact, it can be concluded that the guides produced in this research had sufficient mechanical strength to be demolded, transported and stored before use in the same way that guides conventional precast pavement.

**Key words:** sugarcane, concretes, mortars, durability, technical feasibility.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Mapa da distribuição da cana-de-açúcar no Brasil.....	32
Figura 2.2.	Área cultivada com cana-de-açúcar em São Paulo e estados vizinhos, safra 2010.....	33
Figura 2.3.	Crescimento estimado da produção de energia elétrica a partir da queima da palha e do bagaço da cana-de-açúcar. ....	35
Figura 2.4.	Lavagem da cana-de-açúcar para retirada de impurezas.....	37
Figura 2.5.	Esquema global do processo de produção de açúcar e álcool.....	38
Figura 2.6.	Área plantada para produção de etanol. ....	41
Figura 2.7.	Cana-de-açúcar: corte, moagem, produção e queima do bagaço. ....	43
Figura 2.8.	Disposição final da CBC. ....	48
Figura 2.9.	Bagaço de cana-de-açúcar [a] e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta [b], cinza com menor teor de carbono [c] e cinza gerada após a combustão completa [d]. ....	48
Figura 2.10.	Morfologia das partículas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. ....	50
Figura 2.11.	Local de extração de areia para construção civil em Seropédica, RJ.....	54
Figura 2.12.	Sistema de mineração da areia extraída de rios: (a) e (b) barcaça extraindo a areia; c) silo de estocagem de areia; e d) separação e controle no areal. ....	55
Figura 2.13.	Micrografias de várias partículas de resíduo de PET. [a] Tipo A; [b] Tipo C; [c] Tipo D. ....	58
Figura 2.14.	Resistência à compressão dos corpos de prova em concreto com substituição de areia por RP. ....	59
Figura 2.15.	Resíduo de ferro usado como substituto da areia. ....	59
Figura 2.16.	Resistência à compressão de argamassas com substituição de areia por RSMI. ....	62
Figura 2.17.	Resistência à compressão de argamassas com substituição de areia por CVV. ....	62
Figura 2.18.	Disposição final das cinzas em bacias de decantação. ....	67
Figura 2.19.	Valores de resistência à compressão em função da idade de cura. ....	70

Figura 2.20. Difratoograma da CBC e da areia.....	72
Figura 2.21. Efeito da temperatura de queima na reatividade da CBC utilizando o método de <i>Chapelle</i> modificado.....	73
Figura 3.1. Localização das usinas em um raio de 100 km da cidade de São Carlos. ....	83
Figura 3.2. Cinza estocada ao ar livre na usina na cidade “A”.....	84
Figura 3.3. Retirada da cinza da caldeira (esquerda) e secagem da cinza ao ar livre (direita) – usina na cidade “J”.....	85
Figura 3.4. Coleta da cinza na usina na cidade “B”.....	85
Figura 3.5. Moagem da CBC em moinho do tipo almofariz-pistilo .....	86
Figura 3.6. Aspecto visual da CBC antes (esq.) e após a moagem (dir.).....	87
Figura 3.7. Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.....	90
Figura 3.8. Curva granulométrica da areia natural (NM 248).....	91
Figura 3.9. Materiais utilizados na moldagem das argamassas para o ensaio de resistência à compressão.....	96
Figura 3.10. Ensaio de retração por secagem - desmoldagem dos corpos de prova depois de 24 horas (esq.); Cura inicial em água saturada com cal (dir.).....	98
Figura 3.11. Curva de Abrams.....	101
Figura 3.12. Separação e mistura dos materiais na betoneira .....	102
Figura 3.13. Moldagem e adensamento dos corpos de prova.....	103
Figura 3.14. a) Ensaio de resistência à compressão axial (esq.); b) Transdutores elétricos acoplados ao corpo de prova para medição do deslocamento longitudinal (dir.).....	104
Figura 3.15. Montagem do apoio ao corpo de prova para ensaio de tração por compressão diametral.....	105
Figura 3.16. Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de abrasão.....	107
Figura 3.17. Esquematização das formas - técnica do fio quente paralelo.....	108
Figura 3.18. Montagem dos fios paralelos nas formas de madeira.....	108
Figura 3.19. Ensaio dos corpos de prova pelo método do fio quente paralelo .....	109
Figura 3.20. Meio-fio simples e acostamento.....	112
Figura 3.21. Desmoldagem dos prismas, após 72 horas.....	113

Figura 3.22. Esquema de posicionamento dos prismas na prensa de ensaio.....	110
Figura 3.23. Formas para a moldagem das guias de pavimentação.....	114
Figura 3.24. Etapa de moldagem e cura das guias de pavimentação.....	114
Figura 4.1. Difratoograma da amostra CBC-A (Q = quartzo).....	121
Figura 4.2. Difratoograma da amostra CBC-B (Q = quartzo).....	121
Figura 4.3. Difratoograma da amostra CBC-I (Q = quartzo). .....	121
Figura 4.4. Difratoograma da amostra CBC-J (Q = quartzo). .....	122
Figura 4.5. Micrografias das amostras de CBC com ampliação de 1000x.....	123
Figura 4.6. Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas (amostra CBC-A) .....	125
Figura 4.7. Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas (amostra CBC-J).....	126
Figura 4.8. Ruptura dos corpos de prova de argamassa – modelo cônico.....	126
Figura 4.9. Etapas, em laboratório, dos testes realizados para os ajustes nos traços de concreto .....	129
Figura 4.10. Concretos – Massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco .....	130
Figura 4.11. Valores médios de resistência à compressão dos concretos da série A .....	131
Figura 4.12. Valores médios de resistência à compressão dos concretos da série B.....	131
Figura 4.13. Valores médios de resistência à compressão dos concretos da série C.....	132
Figura 4.14. Valores médios do módulo de elasticidade dos concretos, aos 28 dias .....	133
Figura 4.15. Resistência à tração por compressão diametral e a relação da resistência à compressão pela resistência à tração dos concretos, aos 28 dias .....	135
Figura 4.16. Relação entre a resistência à compressão e o índice de vazios dos concretos no estado endurecido.....	136
Figura 4.17. Corpos de prova rompidos e tratados com a fenolftaleína – ensaio de carbonatação natural.....	137
Figura 4.18. Valores de profundidade de carbonatação dos concretos em estudo .....	137
Figura 4.19. Valores da perda de massa dos concretos por meio do ensaio de abrasão.....	138
Figura 4.20. Corpos de prova de concreto submetidos ao ensaio de abrasão, após 72 h .....	139
Figura 4.21. Expansão dos corpos de prova de argamassa até a idade de 30 dias. ....	141

Figura 4.22. Resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com 30% de CBC em comparação aos concretos de referência.....	147
Figura 4.23. Resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com 50% de CBC em comparação aos concretos de referência.....	147
Figura 4.24. Guia e miniguia depois da desmoldagem .....	148

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição típica da cana-de-açúcar.....	30
Tabela 2.2. Processo de produção industrial da cana-de-açúcar.....	31
Tabela 2.3. Comparação das emissões de CO <sub>2</sub> por diferentes combustíveis na geração de energia elétrica.....	36
Tabela 2.4. Resistência à compressão dos concretos confeccionados com resíduo de vidro .....	60
Tabela 2.5. Composição química – CCA, CBC e CPC .....	68
Tabela 2.6. Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	69
Tabela 2.7. Traço das argamassas (em massa).....	71
Tabela 2.8. Influência dos metais pesados na reatividade hidráulica e na qualidade do cimento e concreto. ....	76
Tabela 3.1. Resumo dos ensaios e a metodologia utilizada – 1 <sup>a</sup> . Fase.....	81
Tabela 3.2. Resumo dos ensaios e a metodologia utilizada – 2 <sup>a</sup> ., 3 <sup>a</sup> . e 4 <sup>a</sup> . Fases .....	82
Tabela 3.3. Valores de produção das unidades da região centro-sul, safra 2008/2009.....	84
Tabela 3.4. Propriedades físicas e químicas - CPV ARI RS.....	88
Tabela 3.5. Propriedades físicas – CP III 40 RS .....	89
Tabela 3.6. Propriedades físicas – CP II E 32.....	89
Tabela 3.7. Granulometria da areia natural (NM 248).....	91
Tabela 3.8. Análise granulométrica do agregado graúdo.....	92
Tabela 3.9. Dados – dados da moldagem das argamassas .....	97
Tabela 3.10. Dados – Ensaio de retração .....	98
Tabela 3.11. Resistência característica e de dosagem dos concretos.....	100
Tabela 3.12. Dosagens finais dos concretos obtidos em laboratório .....	101
Tabela 3.13. Caracterização das propriedades dos concretos - Ensaios normalizados.....	103
Tabela 4.1. Resultado da análise química com os principais elementos identificados nas amostras de CBC.....	117



Tabela 4.2. Análise granulométrica da amostra CBC-A .....	118
Tabela 4.3. Análise granulométrica da amostra CBC-B .....	119
Tabela 4.4. Análise granulométrica da amostra CBC-I.....	119
Tabela 4.5. Análise granulométrica da amostra CBC-J.....	120
Tabela 4.6. Resumo das propriedades físicas das amostras de CBC.....	120
Tabela 4.7. Resultados do ensaio de absorção.....	123
Tabela 4.8. Propriedades físicas e químicas da CBC utilizada como substituta parcial da areia.....	124
Tabela 4.9. Resultados do ensaio de massa específica no estado fresco (CBC-A) .....	125
Tabela 4.10. Resultados do ensaio de massa específica no estado fresco (CBC-J) .....	125
Tabela 4.11. Resultados - Ensaio NBR 12650/92 .....	128
Tabela 4.12. Valores finais do abatimento e do teor de argamassa dos concretos obtidos em laboratório .....	130
Tabela 4.13. Valores de resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias .....	133
Tabela 4.14. Valores dos módulos de elasticidade dos concretos obtidos em laboratório em comparação com os valores mínimos da NBR 6118 .....	134
Tabela 4.15. Valores do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica no estado endurecido .....	135
Tabela 4.16. Resumo dos valores obtidos nos ensaios relacionados à avaliação da durabilidade .....	139
Tabela 4.17. Valores de condutividade térmica dos concretos, aos 60 dias.....	140
Tabela 4.18. Valores de condutividade térmica dos concretos de acordo com norma NBR 15220 .....	140
Tabela 4.19. Parâmetros acima do limite permitido para o extrato solubilizado (CBC-J).....	142
Tabela 4.20. Parâmetros acima do limite permitido para o extrato lixiviado (CBC-J) .....	142
Tabela 4.21. Parâmetros acima do limite permitido para o extrato solubilizado (concretos) .....	143
Tabela 4.22. Preços dos insumos considerados no valor global de cada concreto.....	145
Tabela 4.23. Resultados do ensaio de resistência à flexão dos prismas .....	146

# LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferro-aluminato tetracálcico
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBC	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
CCA	Cinza da casca do arroz
CCCC	Cinza da casca da castanha de caju
CH	Hidróxido de cálcio
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPC	Cinza da palha da cana-de-açúcar
CPT	Cinza da palha de trigo
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
CVV	Cinza volante vitrificada
DMC	Dimensão máxima característica
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DrX	Difratometria de raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
ICR	Índice Custo/Resistência
MEV	Microscopia eletrônica de varredura

MF	Módulo de finura
NBR	Norma brasileira
NM	Norma Mercosul
PET	Polietileno tereftalato
PF	Perda ao fogo
pH	Potencial hidrogeniônico
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PVC	Policloreto de vinila
RCD	Resíduos de construção e demolição
RPM	Rotações por minuto
RSMI	Resíduo sólido municipal incinerado
RV	Resíduos de vidro
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1.	Justificativas .....	23
1.2.	Objetivos.....	25
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>29</b>
2.1.	A cana-de-açúcar .....	22
2.1.1.	O processo de produção e os principais insumos .....	28
2.1.2.	Os resíduos e os impactos da indústria sucroalcooleira.....	34
2.2.	A substituição de agregados miúdos por resíduos .....	43
2.2.1	Os agregados naturais .....	45
2.2.2.	A substituição de areia natural por resíduos .....	47
2.3.	O uso das cinzas em argamassas e concretos .....	55
2.3.1.	As aplicações da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	60
2.4.	O encapsulamento de resíduos sólidos .....	67
2.5.	Considerações a respeito da substituição de agregados miúdos pela CBC .....	69
<b>3.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>79</b>
3.1.	Coleta das cinzas e preparação das amostras.....	75
3.2.	Materiais utilizados na pesquisa .....	79
3.2.1.	Cimento Portland .....	79
3.2.2.	Agregado miúdo .....	82
3.2.3.	Agregado graúdo .....	84
3.2.4.	Cal hidratada.....	84
3.2.5.	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	85
3.3.	Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	85
3.3.1.	Análise química – óxidos.....	85
3.3.2.	Massa específica e massa unitária .....	85
3.3.3.	Análise por difratometria de raios X .....	86
3.3.4.	Análise por microscopia eletrônica de varredura .....	87

3.3.5.	Análise granulométrica .....	87
3.3.6.	Absorção .....	88
3.4.	Estudo das propriedades das argamassas .....	88
3.5.	Estudos da dosagem dos concretos .....	91
3.6.	Estudo das propriedades dos concretos .....	94
3.7.	Estudo da durabilidade dos concretos .....	97
3.8.	Análise da lixiviação/solubilização dos metais pesados .....	102
3.9.	Análise da viabilidade econômica dos concretos .....	102
3.10.	Produção e análise de artefato para infraestrutura com a incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	103
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>117</b>
4.1.	Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	108
4.2.	Análise das propriedades das argamassas .....	115
4.3.	Análise das propriedades dos concretos.....	120
4.4.	Análise da durabilidade dos concretos .....	127
4.5.	Análise dos metais pesados presentes no concreto .....	133
4.6.	Análise da viabilidade econômica dos concretos.....	135
4.7.	Análise do artefato produzido com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	137
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>149</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO .....</b>	<b>151</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE I – PRODUÇÃO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA (BTC) PRODUZIDOS COM A CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....</b>	<b>165</b>

# 1

## Introdução

---

O interesse na realização desta pesquisa justificou-se pela necessidade de se avaliar a possibilidade do emprego da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em produtos para a construção, notadamente aplicados na infraestrutura urbana.

Primeiramente, pelos resultados preliminares obtidos por outros pesquisadores, que atestam a viabilidade do uso das cinzas, e de outros resíduos, em substituição parcial ou total ao agregado miúdo em matrizes cimentícias. Em segundo lugar, pela necessidade em se pesquisar tecnologias alternativas para a infraestrutura urbana, com melhor desempenho ambiental, social, econômico e tecnológico, favorecendo o alcance desse serviço a todos os seguimentos da sociedade.

As cinzas vegetais destacam-se entre os demais resíduos por serem resultados diretos da maior atividade econômica do país, a agroindústria, sendo a CBC o subproduto resultante da maior dessas atividades, a agroindústria sucroalcooleira. Atualmente, o Brasil é o maior produtor de derivados da cana-de-açúcar no mundo e a produção tende a crescer continuamente devido a Política Nacional de Biocombustíveis, da qual um dos objetivos é aumentar a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional. Tais medidas levam a expectativa do aumento contínuo na geração de CBC, problema já enfrentado pelos administradores das usinas no que diz respeito à disposição final desse resíduo.

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.

Uma vez que a construção civil consome grandes quantidades de recursos naturais, vários estudos estão sendo realizados nesse setor, objetivando a substituição de matérias-primas (cimento e agregados) por resíduos industriais e urbanos.

Utilizados como matéria-prima em artefatos para infraestrutura urbana, os resíduos deixariam de ser causa primária de problemas ligados à saúde pública e ao meio ambiente. Adicionalmente, seriam diminuídos tanto os custos finais da rede de saneamento urbano quanto os relativos à disposição desses subprodutos em aterros sanitários específicos. A interdependência dos conceitos de meio ambiente, valoração de resíduos, saúde e saneamento, apresenta-se bastante clara e as ações nesses setores devem, portanto, ser integradas e voltadas, em última análise, para a melhoria da qualidade de vida da população brasileira.

## **1.1. Justificativas**

De modo a tornar clara a contribuição da presente pesquisa, apresentam-se diversos impactos previstos no âmbito científico, tecnológico, social, econômico e ambiental no sentido de comprovar a relevância de estudos que contribuam para o aprimoramento da tecnologia de uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material substituto do agregado miúdo em concretos.

### **1.1.1. Impactos científicos e tecnológicos**

Com a aplicação de resíduos de origem agroindustrial na produção de componentes para infraestrutura urbana foi possível a investigação de novas soluções tecnológicas pertinentes a argamassas e concretos confeccionados com resíduos, principalmente em relação ao seu uso como substituto do agregado miúdo. É importante salientar que para uma efetiva contribuição e transferência tecnológica, tornou-se imprescindível a produção de conhecimento científico pertinente a novos materiais para uso na construção civil, desde os aspectos macroestruturais até aos relacionados à durabilidade e a comparação com outros materiais convencionais.

### **1.1.2. Impactos ambientais**

A deficiência na gestão e planejamento para a disposição dos resíduos tem se transformado em grave problema urbano e ambiental, o que leva a um gerenciamento oneroso e complexo por parte da administração municipal. A escassez de áreas para deposição de resíduos causada pela ocupação e valorização de áreas urbanas, os altos custos sociais no gerenciamento dos resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental são alguns desses problemas. Muitas vezes, resíduos não-urbanos ou potencialmente recicláveis ocupam espaço nos aterros, o que diminui sua capacidade em longo prazo. Em outros casos, resíduos agroindustriais são dispostos ao ar livre sem nenhum tratamento adequado.

Uma prática para a construção com baixo impacto para o meio ambiente que fomenta o crescimento das cidades apresenta-se com uma tendência que vem se consolidando como importante prática de sustentabilidade. Com a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo pretende-se diminuir o uso de areia retirada dos rios, e também reduzir o volume desses resíduos destinados inadequadamente. Dessa forma, a infraestrutura das cidades se expande, garantindo a manutenção dos serviços à população sem causar mais impactos ambientais com seu crescimento.

### **1.1.3 Impactos sociais e econômicos**

O Brasil é o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro e exerce a liderança em todos os segmentos (cana-de-açúcar, açúcar e álcool), gerando empregos diretos e indiretos, principalmente ligados ao corte manual da cana.

No entanto, essa atividade deverá ser 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, que feitas geralmente à noite, são necessárias para viabilizar o corte



manual. Apenas na atividade de corte da cana há cerca de trinta mil trabalhadores no Estado de São Paulo, um trabalho insalubre, que muitas vezes leva à morte muitos trabalhadores.

Se por um lado a extinção das queimadas pode resolver um problema ambiental, por outro pode criar um enorme contingente de desempregados, que não serão totalmente absorvidos por outros setores. Com a proposição de um novo valor agregado à cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) pode-se gerar 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 em conjunto com a política nacional de biocombustíveis (subsídios à produção de etanol, etc.) só tende a aumentar a quantidade de resíduos provenientes da cana-de-açúcar, e nesse contexto, a presente proposta representou importante contribuição em termos sociais e econômicos.

Justificou-se, por meio dos impactos apresentados, a viabilidade da substituição da areia natural por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), como opção viável na produção de artefatos de infraestrutura urbana com menor custo em relação aos tradicionais. Aplicada ao âmbito das cidades, tal proposição traduziu-se na possibilidade de uma melhor distribuição dos recursos destinado à infraestrutura, uma vez que se permite ampliar o volume de obras com um mesmo aporte financeiro.

## 1.2. Objetivos

Esta pesquisa apresentou como **objetivo geral** avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em substituição ao agregado miúdo na produção de artefatos em concreto para a infraestrutura urbana. E como **objetivos específicos**:

- a) Estudar e avaliar a composição e as propriedades físico-químicas do resíduo constituído pela CBC;
- b) Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de concretos e argamassas com a CBC incorporada, comparativamente aos valores de referência utilizando agregados

naturais: estabelecer critérios de dosagens para confecção de amostras-ensaio de concreto e argamassa; avaliar as propriedades dos concretos e argamassas no estado fresco e endurecido por meio de ensaios mecânicos e de durabilidade;

- c) Analisar as possibilidades de aplicação da CBC em artefatos para infraestrutura urbana, com base nas propriedades dos concretos e argamassas executados com esse material, por meio da execução, montagem e ensaio de protótipos de elementos de infraestrutura e/ou de mobiliário urbano;
- d) Avaliar os riscos ao meio ambiente provocados pelo uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) incorporada em concretos;
- e) Avaliar a viabilidade econômica de artefatos produzidos com a CBC, por meio da comparação com o custo de elementos convencionais produzidos com agregados naturais.

Para atender os objetivos desta pesquisa, este trabalho está dividido em oito partes: i) Introdução; ii) Revisão da Literatura; iii) Desenvolvimento Experimental; iv) Resultados e Discussões; v) Conclusões; vi) Sugestões para a continuidade do trabalho; vii) Referências; e viii) Apêndice I.

O Capítulo 1 trata de apresentar os objetivos atingidos por esta pesquisa.

O Capítulo 2 trata da revisão da literatura, que abordou os temas referentes a cana-de-açúcar, a substituição dos agregados miúdos por resíduos, o uso das cinzas em argamassas e concretos e o encapsulamento de resíduos sólidos.

O Capítulo 3 apresenta os materiais usados na pesquisa, bem como todos os ensaios e estudos realizados para se atingirem os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos nas várias etapas de pesquisa, bem como as discussões específicas a cada tema.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho, enfatizando a importância da aplicação do tema.

A Capítulo 6 apresenta sugestões de temas para a continuidade desta pesquisa.

As referências bibliográficas utilizadas são apresentadas na sétima parte do trabalho.

No Apêndice, são apresentados os objetivos, a metodologia e os resultados obtidos no Estágio de Doutorado desenvolvido na Universidade de Aveiro. O tema da pesquisa, realizada entre novembro de 2010 e fevereiro de 2011, foi “Produção e análise estrutural de blocos de terra comprimida (BTC) produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar”.

# 2

## Revisão da Literatura

---

Neste capítulo são apresentados os conceitos técnicos e científicos, encontrados na literatura, que complementam este trabalho como base e justificativa para o mesmo.

### 2.1. A cana-de-açúcar

As primeiras notícias sobre a existência da cana-de-açúcar encontram-se anotadas nas escrituras mitológicas dos hindus e nas Sagradas Escrituras. A produção de açúcar, denominada “sarkara”, existia na Índia desde 3000 a.C. Até o século XVIII foi considerada como remédio e mesmo como artigo de luxo. A cana-de-açúcar é uma planta nativa das regiões tropicais, cujo cultivo se estende, atualmente, aos dois hemisférios. A teoria mais aceita de sua origem considera que ela seja nativa das ilhas do Arquipélago da Polinésia, sendo *Saccharum robustum* uma espécie botânica que se originou no centro de expansão da Nova Guiné [CESNIK & MIOCQUE, 2004].

Durante as navegações da Idade Média, as caravelas, antes de iniciarem suas viagens, levavam mudas de cana-de-açúcar junto as suas provisões, para serem plantadas em novas terras e servirem de suprimentos às novas expedições. Foi assim que ela foi introduzida nas Américas com a segunda expedição de Cristóvão Colombo, em 1493 e, no Brasil em 1502, por Martim Afonso de Souza, proveniente de mudas da Ilha da Madeira. Há registro na alfândega de Lisboa de entrada de açúcar brasileiro nos anos de 1520 e 1526 [CESNIK, 2008].

A cana-de-açúcar é uma cultura típica de climas tropicais e subtropicais que se adapta com relativa facilidade a diferentes tipos de solos. É uma das variedades agrônômicas de maior eficiência no processo de fotossíntese, por utilizar entre 2% e 3% da radiação solar incidente na produção de biomassa vegetal [LORA et al., 2001].

Classificada como gênero *Saccharum* [CESNIK e 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 5 a 7 safras (5 a 7 anos). Depois desse período, o plantio pode ser alternado com outro tipo de cultura no terreno [UNICA, 2009]. A composição química típica da cana-de-açúcar é apresentada Tabela 2.1 [CESNIK & MIOCQUE, 2004].

**Tabela 2.1.** Composição típica da cana-de-açúcar.

Composto	Quantidade (% em massa)
Água	74,5
Sacarose [pol*]	12,5
Fibras	10,0
Outros	3,0

\* pol: percentual de sacarose aparente no caldo de cana-de-açúcar.

Fonte: CESNIK & MIOCQUE, 2004

O cultivo da cana-de-açúcar e a produção de seus derivados estão intimamente ligados à própria história e ao desenvolvimento do Brasil [CESNIK, 2008]. Até a metade do século XVIII, o açúcar permaneceu como o principal produto de exportação do país.

A partir de então, a monocultura da cana-de-açúcar sofreu declínio com a diversificação agrícola e a industrialização, porém sempre representou um importante produto comercial brasileiro destinado à produção de açúcar e álcool etílico, principalmente, além de aguardente e ração para animais [CORDEIRO, 2006].

Primeiramente transformada em açúcar, a cana-de-açúcar ocupa um papel de destaque na economia mundial. O Brasil, atualmente, é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o principal exportador de seus derivados - açúcar e etanol [CANA, 2007]. Porém, mesmo após séculos de convívio com a agroindústria canavieira, somente no século XX o Brasil descobriu no álcool uma opção energética viável [PRÓ-ÁLCOOL, 2009]. Resumidamente, as etapas industriais para esses dois processos estão diferenciadas na Tabela 2.2.

No estado de São Paulo, a Cooperativa de Usineiros do Oeste do Estado de São Paulo – Copereste – criou, em 1953, no município de Dumont, região de Ribeirão Preto, uma estação

experimental de pesquisas importantes para aquele estado. Em 1968, a Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo – Copersucar – iniciou um importante programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar, incorporando a Copereste e sua estação experimental [CESNIK & MIOCQUE, 2004].

**Tabela 2.2.** - Processo de produção industrial da cana-de-açúcar

Produção de Açúcar	Produção de Etanol
1. Lavagem da cana;	1. Lavagem da cana;
2. Preparo para moagem ou difusão [cana desfibrada];	2. Preparo para moagem ou difusão [cana desfibrada];
3. Extração do caldo: moagem ou difusão;	3. Extração do caldo: moagem ou difusão;
4. Purificação do caldo: peneiragem e clarificação;	4. Tratamento do caldo para produção do álcool;
5. Evaporação do caldo;	5. Fermentação do caldo;
6. Cozimento;	6. Destilação do vinho;
7. Cristalização da sacarose;	7. Retificação;
8. Centrifugação: separação entre cristais e massa cozida;	8. Desidratação: álcool anidro ou hidratado.
9. Secagem e estocagem do açúcar.	

Fonte: EMBRAPA, 2010

Em 1971, foi criado, pelo Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), do então Ministério da Indústria e Comércio, o Plano Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar. O mesmo instituto foi o responsável pela criação do Pró-Álcool, que foi um programa bem-sucedido de substituição em larga escala dos derivados de petróleo [IAA, 1986; PRÓ-ÁLCOOL, 2009].

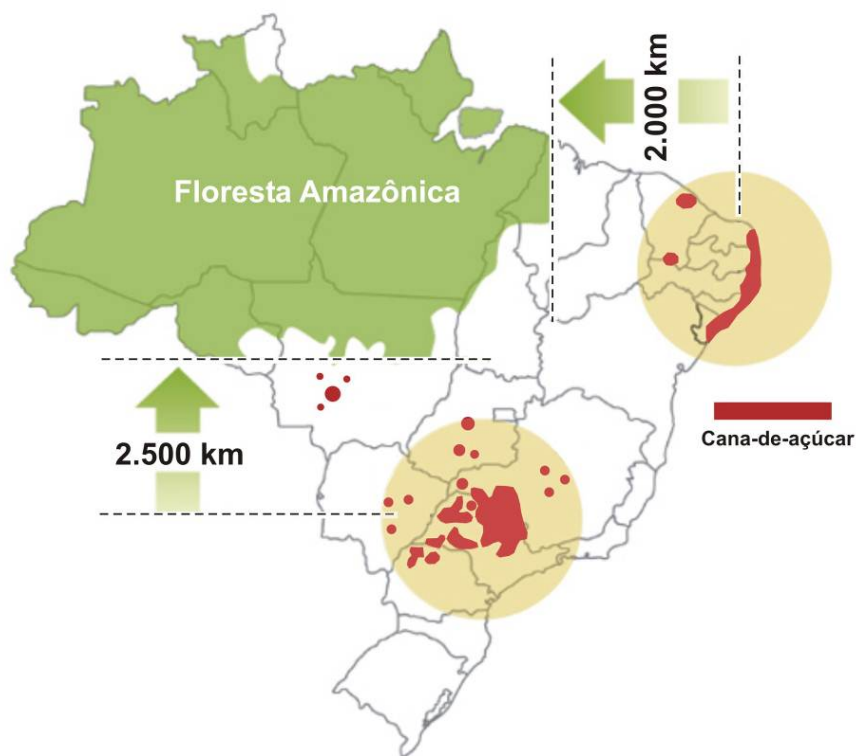
Esse Programa foi desenvolvido para evitar o aumento da dependência externa quando ocorreu aumento significativo no preço de petróleo, na década de 1970. De 1975 a 2000, foram produzidos cerca de 5,6 milhões de veículos a álcool hidratado.

Acrescido a isso, o Programa substituiu, por uma fração de álcool anidro (entre 1,1% a 25%), um volume de gasolina pura consumida por uma frota superior a 10 milhões de veículos a gasolina, evitando, assim, nesse período, emissões de gás carbônico da ordem de 110 milhões de toneladas de carbono (contido no CO<sub>2</sub>), a importação de aproximadamente 550 milhões de barris de petróleo e, ainda, proporcionando uma economia de divisas da ordem de 11,5 bilhões de dólares [PRÓ-ÁLCOOL, 2009].

Mais de 30 anos depois do início do Pro-Álcool, o Brasil tem passado uma nova expansão dos canaviais com o objetivo de oferecer, em grande escala, o combustível alternativo. A previsão do total de cana moída na safra 2011/12 é de 641.982 mil toneladas, com incremento de 2,9% em relação à safra 2010/11, que foi de 623.905, o que significa que a quantidade que será moída deve superar em 18.076 mil toneladas a moagem da safra anterior [CONAB, 2011].

O Brasil é responsável pela produção de cerca de 53% do álcool etílico consumido no planeta e é o maior produtor mundial de açúcar, com 61% das exportações de açúcar de cana no mundo [MAPA, 2011]. A cultura da cana-de-açúcar representa uma das principais atividades agrícolas do país e ocupa uma área plantada de cerca de 8,4 milhões de hectares, distribuída por grande parte do território nacional [CONAB, 2011].

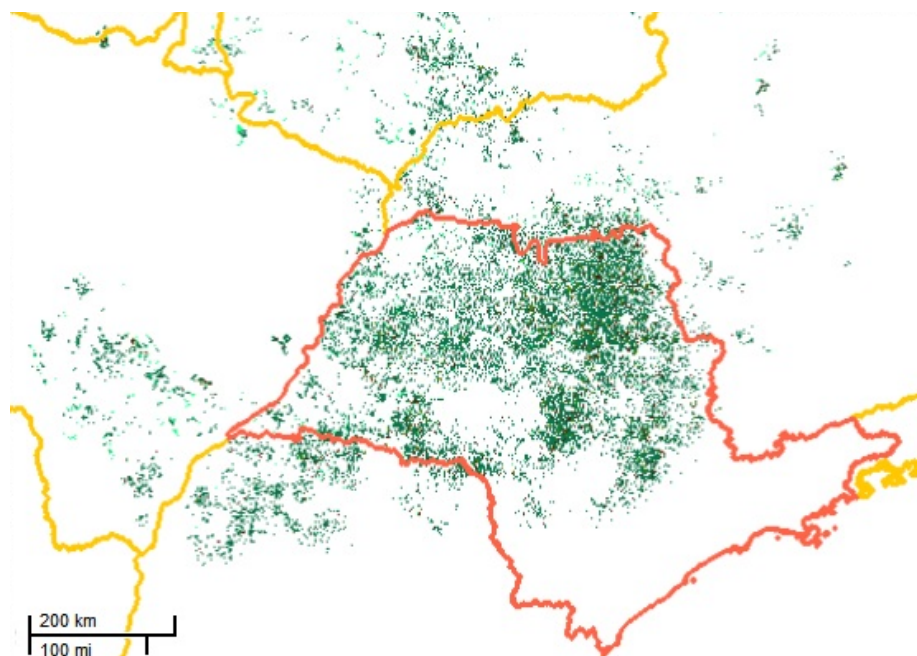
A Região Centro-Sul responde por mais de 85% da produção do setor sucroalcooleiro, sendo São Paulo o principal estado produtor [Figura 2.1].



**Figura 2.1.** Mapa da distribuição da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: ÚNICA, 2009.

Somente o estado de São Paulo destinou uma área de 4,45 milhões de hectares para a colheita desta cultura na safra 2010/2011, representando quase 61% de toda a área de cana da região

Centro-Sul [CONAB, 2011]. Na Figura 2.2, observa-se a área destinada ao cultivo da cana-de-açúcar nos principais estados produtores da região Centro-Sul do país, na safra de 2010, obtida a partir de imagens de satélites de sensoriamento remoto [CANASAT, 2011].



**Figura 2.2.** Área cultivada com cana-de-açúcar em São Paulo e estados vizinhos, safra 2010. Fonte: CANASAT – INPE, 2011.

No ano de 2010, choveu abaixo da média durante quase toda a safra nas regiões produtoras do Centro-Sul, o que favoreceu a maturação e a colheita da safra 2011, mas prejudicou o crescimento da safra 2011/12. Em São Paulo, principal estado produtor, o período de seca foi mais intenso, e as chuvas permaneceram abaixo da média em outubro, novembro e dezembro, nas principais regiões produtoras do Estado [CONAB, 2011].

Com o objetivo de buscar estratégias para aumentar a produtividade da cana, o estado de São Paulo abriga, há quase 40 anos, o Centro de Tecnologia Canavieira (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].



Outro pólo de estudos da cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo, encontra-se na Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, campus de Araras. Neste local funciona o Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Sócio economia Rural, que foi criado no ano de 1991, a partir da incorporação do corpo técnico e das instalações das Seções de Indústria e Economia e Planejamento do Planalsucar (órgão de pesquisa do extinto Instituto do Açúcar e do Alcool – IAA) pela UFSCar.

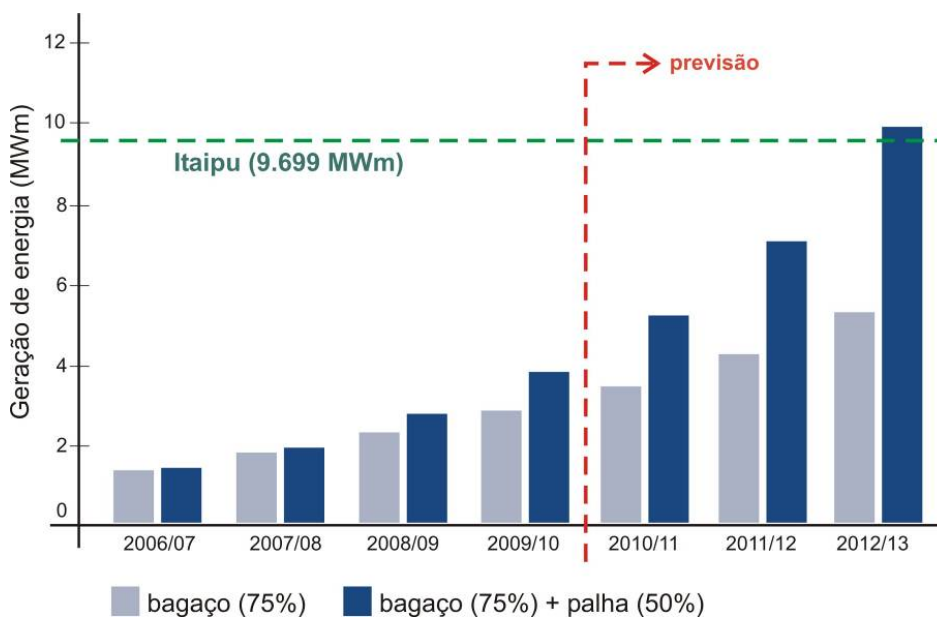
Dentro do contexto da cogeração, e em face da crise do setor energético brasileiro, que ocorreu em 2001, o setor sucroalcooleiro tem apresentado um grande potencial de geração de energia, apresentando atrativos econômicos e ambientais, principalmente devido à queima de bagaço de cana-de-açúcar na produção como combustível [PRADO, 2007].

A energia de biomassa é aquela fornecida por materiais de origem vegetal renovável ou obtida pela decomposição de dejetos. Atualmente, são conhecidas diversas fontes renováveis de biomassa como: lenha, carvão vegetal, babaçu, óleos vegetais, resíduos vegetais, sisal, biogás, casca de arroz, cana de açúcar - bagaço da cana, palha e álcool [FIESP/CIESP, 2001]. Pelos dados contidos no Relatório UNICA [2005], pode-se destacar que a cultura da cana-de-açúcar pode ser caracterizada como uma cultura de alta eficiência de fotossíntese, portanto, com grande produção de biomassa por unidade de área.

Segundo Sartori e Florentino [2002], a biomassa residual do cultivo de cana-de-açúcar é representada por folhas, palhas, ponteiros e frações de colmo que somam uma produção aproximada de 108 milhões de toneladas por ano; quantidade que permitiria a produção de 10,2 MWh de energia. No entanto, o bagaço é o único subproduto da cana-de-açúcar utilizado para geração de energia por meio da cogeração. Com a mudança do tipo de colheita realizada, de manual para mecânica, até 2017, o percentual de palha misturada ao bagaço deve aumentar a produção de energia gerada e, conseqüentemente, a geração de cinza residual.

Segundo Moreira e Goldemberg [1999], cerca de 450 a 500 kg de vapor são gerados a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar. Em média, cada tonelada de cana processada requer cerca de 12 kWh de energia elétrica, o que pode ser gerado pela queima do bagaço. Como os custos de geração são competitivos com os do sistema convencional de suprimento, a cogeração possibilita a autosuficiência do setor em termos de suprimento de energia elétrica [ANEEL, 2005].

O potencial de geração de energia a partir do bagaço de cana é da ordem de 15% de toda demanda nacional, patamar que pode ser atingido até 2020 [REVISTA ABENDE, 2008]. A Revista Pesquisa FAPESP [2009] destaca que a geração de eletricidade com a queima do bagaço e da palha poderá superar, já em 2013, a capacidade da maior hidrelétrica do Brasil, a usina de Itaipu, segundo mostra a Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Crescimento estimado da produção de energia elétrica a partir da queima da palha e do bagaço da cana-de-açúcar. Fonte: Revista Pesquisa FAPESP, 2009 [adaptado].

Por esses fatores, o setor sucroalcooleiro tem características que o distinguem de outros segmentos de cogeração no país. Em primeiro lugar, pode ser considerado autossuficiente em termos de geração de energia elétrica para consumo próprio, uma vez que a maior parte das usinas de açúcar e álcool produz a eletricidade que consome em seus processos. Em segundo lugar, o setor é o que tem maiores expectativas quanto à geração de excedentes de energia, por conta do crescente aumento na produção de açúcar e álcool [PRADO, 2007].

Em relação à poluição ambiental, a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar produz substancial liberação de carbono na forma de CO<sub>2</sub>. Entretanto, o balanço nas emissões de CO<sub>2</sub> é praticamente nulo, pois, através da fotossíntese, a biomassa queimada é repostada no ciclo seguinte da cultura da cana [CORDEIRO, 2006].

Quando se considera o ciclo de vida completo da biomassa, incluindo o consumo direto e indireto de combustíveis fósseis, verifica-se emissão de CO<sub>2</sub>, mas, mesmo nesse caso, seu

valor é significativamente menor se comparado com outras fontes de combustíveis fósseis, conforme pode ser observado na Tabela 2.3 [FIESP/CIESP, 2001].

**Tabela 2.3.** Comparação das emissões de CO<sub>2</sub> por diferentes combustíveis na geração de energia elétrica.

Tipo de combustível	Emissões (kg CO <sub>2</sub> /kWh)	Condições
Cana-de-açúcar	0,057 – 0,110	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Madeira	0,047	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Óleo combustível	0,870	Somente queima combustível
Gás natural	0,380	Somente queima combustível

Fonte: FIESP/CIESP, 2001.

Nesse contexto, a agroindústria sucroalcooleira tem como meta desenvolver a produção de seus principais insumos, o açúcar e o álcool, sem, no entanto, desatentar para o impacto ambiental positivo advindo da utilização do bagaço como fonte de energia alternativa.

### **2.1.1. O processo de produção e os principais insumos**

A produção de cana aumentou de cerca de 120 para 240 milhões de toneladas, entre 1975 e 1985, estabilizando-se nesse patamar entre 1985 e 1995. A partir desse ano iniciou-se outro ciclo de expansão agrícola, basicamente motivado pela exportação de açúcar. Em 1990, a exportação de açúcar foi de 1.200 toneladas, ascendendo a 19.600 toneladas em 2006, o que mostra o grande aumento da competitividade do produto brasileiro. O atendimento das demandas interna e externa de etanol e açúcar resultaria na necessidade de uma produção de cana-de-açúcar de cerca de 680.000 toneladas de cana por ano, até 2012/2013 [RELATÓRIO UNICA, 2005].

No processo de produção dos insumos, são usados cinco ou seis cortes antes da reforma do canavial e o período de safra é de seis ou sete meses. Todo o processo de produção é intensivo em mão-de-obra, especialmente a colheita; o avanço da mecanização vem reduzindo o número de empregos (por unidade de produção) e também a sua sazonalidade.

A cultura utiliza fertilizantes e defensivos agrícolas, moderadamente, e recicla todos os efluentes industriais da produção de etanol e açúcar como insumos para a lavoura. A prática da queima do canavial antes da colheita (retirando as folhas, para facilitar o corte) está sendo gradualmente reduzida, com restrições ambientais e de segurança em algumas áreas, mas ainda é dominante.

O transporte da cana para a indústria (considerando a operação integrada de corte, carregamento e transporte) procura evitar a compactação do solo agrícola e reduzir custos, com sistemas de grande capacidade, dentro dos limites legais das estradas.

Os colmos de cana são processados para produzir etanol e açúcar; parte da cana é lavada para retirar impurezas minerais (a cana de colheita manual, apenas) como é apresentada na Figura 2.4. Um sistema de extração (no Brasil, quase exclusivamente moagem: a cana é picada, desfibrada e passa por uma série de moendas) separa o caldo, contendo a sacarose, da fibra (bagaço).

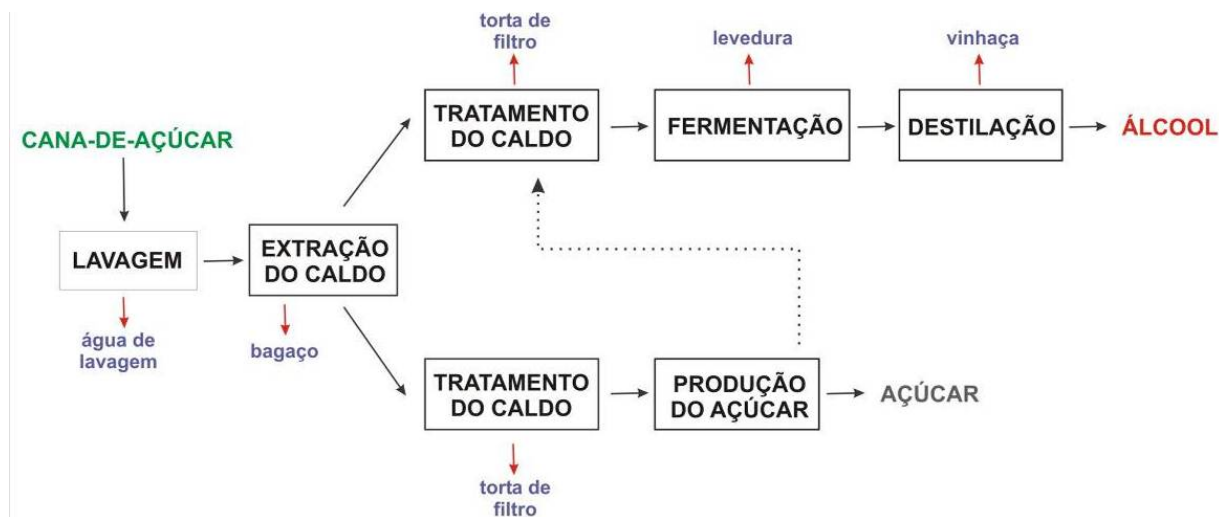


**Figura 2.4.** Lavagem da cana-de-açúcar para retirada de impurezas. Foto: Patrícia Cândida Lopes. Fonte: Agência EMBRAPA, 2010.

Para a produção de açúcar, o caldo é limpo (decantação e filtro prensa, retirando um resíduo, a torta de filtro), concentrado e cristalizado. Uma parte dos açúcares não cristalizados e das impurezas (melaço) é separado. No Brasil, esse melaço residual é, em geral, muito mais rico em açúcar, o que evita a cristalização no estágio final ao utilizar o mel, em mistura com caldo, como insumo para a fermentação.

Essa mistura (mel+caldo) é levada à concentração adequada e fermentada com leveduras. Os sistemas utilizados são na maioria do tipo *fed-batch*, com reciclo da levedura, mas há processos contínuos. O vinho resultante é destilado, produzindo álcool (hidratado ou anidro) e deixando como resíduo a vinhaça.

Toda a energia para o processamento (elétrica; mecânica, no acionamento de algumas bombas, ventiladores e das moendas; térmica, para os processos de concentração do caldo e destilação) pode ser suprida por um sistema de cogeração que usa somente o bagaço como fonte energética; a usina em geral é autosuficiente, e pode ter excedentes de energia. As diferentes etapas que envolvem a produção sucroalcooleira são apresentadas na Figura 2.5.



**Figura 2.5.** Esquema global do processo de produção de açúcar e álcool. Fonte: Moreira e Goldemberg, 1999 [adaptado].

Dos principais insumos obtidos com a cana, o açúcar foi o primeiro produto a ser produzido no Brasil pela indústria sucroalcooleira. Segundo boletim da Agência de Informações da EMBRAPA [2010], projeções de médio e longo prazo indicam que o consumo mundial de açúcar continuará aumentando. Este crescimento poderá ser de cerca de 21% até 2015, atingindo 176 milhões de toneladas.

Essa expansão decorre de vários fatores, tais como: i) Aumento do poder de compra dos consumidores em diversas regiões do mundo; ii) Crescimento do consumo de alimentos processados, resultante da migração da população de áreas rurais para urbanas; iii) Tendência do consumo de adoçantes de baixas calorias à base de açúcar, como a sucralose.

A sacarose do açúcar é uma matéria-prima muito versátil, por ser uma molécula muito reativa, do ponto de vista químico e enzimático, com seus oito grupos hidroxila, podendo agir como base para vários “blocos” construtivos de moléculas de interesse [RELATÓRIO ÚNICA, 2005]. Outro importante produto derivado da cana é a lisina, utilizada em suplementos alimentares, poliésteres, celulose, vitamina B, solventes, polietileno e energia elétrica com o bagaço, um exemplo de sinergia entre alimentos, combustíveis e produção de materiais [REVISTA PESQUISA FAPESP, 2009].

A previsão de esmagamento de cana para a produção de açúcar é de 308.888 mil toneladas, correspondendo a 48,10% da previsão de moagem da safra 2011/2012. Na região Centro-Sul a destinação de cana para a produção de açúcar foi de 47,93%. Na safra passada, a destinação de cana para produção de açúcar foi de 46%, considerando todo o país [CONAB, 2011].

O álcool foi o segundo mais importante produto obtido da cana-de-açúcar. Desde as primeiras décadas do século XX, o álcool etílico tem sido empregado de forma sistemática como combustível no Brasil. Contudo, a expansão do uso do álcool anidro adicionado à gasolina somente aconteceu com a criação do Programa Nacional do Álcool pelo Governo Federal (PROÁLCOOL), em 1975 [MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999].

Essa iniciativa teve o intuito de diminuir a dependência nacional das importações de petróleo. Após a crise mundial de 1979, iniciou-se a segunda etapa do PROÁLCOOL, que objetivou a produção de álcool hidratado para ser utilizado como substituto da gasolina. O sucesso do novo combustível foi extraordinário: em 1985, cerca de 96% dos automóveis apresentavam motores a álcool hidratado. As escalas de produção e moagem da cana cresceram e ganhos significativos em produtividade foram alcançados [WAACK e NEVES, 1998].

Desde 1986, a redução do impacto da crise do petróleo e os planos econômicos internos para combater a inflação estimularam uma curva descendente na produção de carros a etanol, que culminou com a crise de abastecimento de 1989. A participação anual dos veículos a etanol caiu para 1,02% na frota nacional, em 2001 [ÚNICA, 2009].

Mesmo assim, em 2003, a indústria automobilística lançou o motor bicomcombustível que opera com álcool, gasolina, ou com qualquer mistura entre os dois. Este advento proporcionou uma

nova ascensão à produção da cana-de-açúcar, bem como um rejuvenescimento das usinas produtoras do referido combustível [CORDEIRO, 2006].

Atualmente, cerca de 90% dos carros novos vendidos no Brasil são flexíveis. Segundo Carlos Henrique de Brito Cruz, da FAPESP, a “gasolina é que se tornou o combustível alternativo do Brasil”, uma vez que, se o álcool é vendido puro nas bombas dos postos, a gasolina é comercializada misturada a 25% de etanol [REVISTA PESQUISA FAPESP, 2009].

A extensa gama de produtos do etanol (via química), que chegou à comercialização na década de 1980, e depois foi abandonada em função dos elevados custos em comparação ao etanol e à nafta, certamente têm sido reanalisadas. Foram desenvolvidas e implementadas no Brasil rotas baseadas no etileno, no acetaldeído e em vários casos em transformações diretas. São todos processos amplamente conhecidos, sem maior complexidade, e há domínio no país sobre dezenas de tecnologias [RELATÓRIO ÚNICA, 2005].

Juntamente com o Brasil, os Estados Unidos são o outro grande produtor mundial de etanol, que no caso americano, é obtido principalmente do milho. No ano de 2007, os EUA produziram 26 bilhões de litros de etanol de milho. No caso do etanol de cana-de-açúcar, o Brasil ainda é o maior produtor mundial.

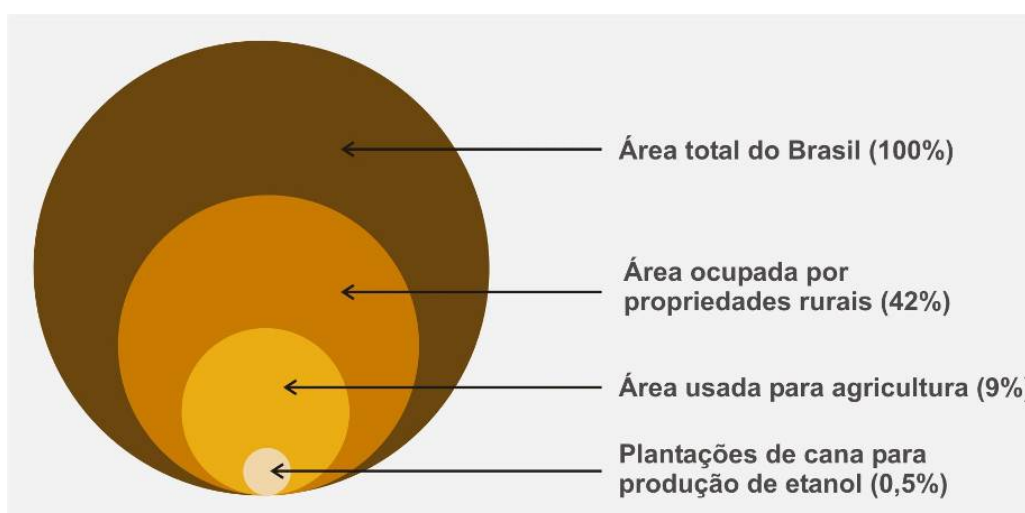
Do total de cana esmagada, 333.101,8 mil toneladas serão usadas para a produção de etanol que deverão produzir 27.090.915 mil litros, 1,83% menor que a produção da safra 2010/11. A divisão dos produtos é de 8.708.512 mil litros de etanol anidro e 18.382.402 mil litros de etanol hidratado. Por estes números, o etanol anidro deverá ter um aumento de 8,63% na produção e o etanol hidratado deve ter uma redução de 6,10%, quando comparados com a produção de etanol da safra anterior [CONAB, 2011].

Em relação ao problema ambiental, o etanol além de substituir parte do petróleo, apresenta a vantagem de produzir menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que a gasolina, e parte significativa desse gás ser reabsorvido pela cana na safra seguinte [REVISTA PESQUISA FAPESP, 2009].

A ideia corrente de que o avanço da cana ampliaria o desmatamento da Amazônia foi contestada no workshop *Physics and Chemistry of Climate Change and Entrepreneurship*,

ocorrido na sede da FAPESP, em 2009. Salientou-se que não é viável plantar cana na Amazônia, por uma série de fatores, e que as principais áreas de cultivo encontram-se nas regiões Sudeste e Nordeste, mais de 2.000 km de distância da floresta.

Mesmo as acirradas discussões internacionais sobre a expansão dos biocombustíveis e a escassez de alimentos, não deve frear o crescimento da cana-de-açúcar. Em relação ao Brasil sabe-se que apenas 1% da área agriculturável (ou 0,5% do território brasileiro) é ocupada pela produção de cana-de-açúcar, enquanto que 49% desse território é dedicado às pastagens, como mostra a Figura 2.6 [REVISTA PESQUISA FAPESP, 2009].



**Figura 2.6.** Área plantada para produção de etanol. Fonte: Revista Pesquisa FAPESP, 2009 [adaptada]

A demanda por etanol de cana-de-açúcar deverá continuar em ascensão nos próximos dez anos, devendo atingir um crescimento de 150% no período, de acordo com previsão do Ministério das Minas e Energia - MME. O Plano Decenal de Expansão de Energia apontou um acréscimo de demanda em torno de 11,3% ao ano, até 2017 [NOTÍCIAS ÚNICA, 2009].

Outros insumos, também obtidos a partir da cana-de-açúcar, são a cachaça e a rapadura. Ambos tiveram sua produção iniciada no Brasil colonial e perduram até os dias atuais como produtos regionais de boa aceitação no mercado interno e externo, como no caso da cachaça.

Segundo reportagem da Revista Pesquisa FAPESP [2008], o mais recente produto derivado da cana-de-açúcar é o diesel, fato anunciado pela empresa Amyris-Crystalsev, uma parceria no formato *joint venture*, entre a Amyris, empresa norte-americana de biotecnologia, e a



Crystalsev, uma das maiores empresas de comercialização de etanol e açúcar do Brasil, que pertence ao mesmo grupo da Usina Santa Elisa, de Sertãozinho, no interior paulista.

A produção será possível por meio de modificações genéticas em linhagens da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, responsável por transformar o caldo de cana em etanol durante o processo de fermentação nas usinas. A transformação faz o microorganismo secretar uma substância chamada farneseno, em vez de etanol, que pode ser utilizado em qualquer motor à diesel, principalmente em caminhões, ônibus e tratores.

O diesel produzido a partir da cana é melhor do que o diesel à base de petróleo, principalmente porque não tem enxofre, um dos maiores responsáveis pela poluição do ar atmosférico. Porém, para o novo diesel ser competitivo, o barril de petróleo deve estar próximos aos US\$ 60.00.

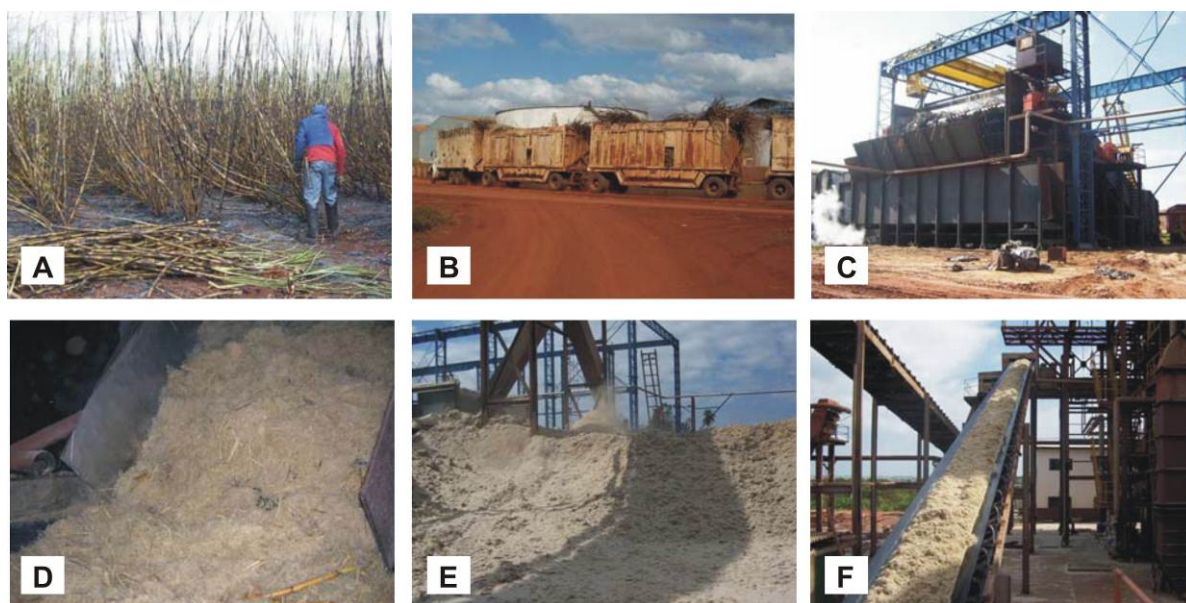
### **2.1.2. Os resíduos e os impactos da indústria sucroalcooleira**

Na indústria sucroalcooleira, por muitos anos, existiu o grande desafio em relação ao descarte dos resíduos gerados no processo de produção de açúcar e álcool. Isso se deu porque o processo produtivo gerava externalidades negativas quando os resíduos eram descartados no meio ambiente. Atualmente, tornou-se uma vantagem econômica utilizar esses resíduos, à medida que geram externalidades positivas [JENDIROBA, 2006].

Considerando-se que, para cada tonelada de cana moída ou esmagada na unidade industrial, em média se obtém 120 kg de açúcar e mais 14 litros de álcool, ou 80 litros de álcool no caso de destilarias, e que, para essa tonelada de cana-de-açúcar tem-se de 100 a 400 kg de torta de filtro, 800 a 1000 litros de vinhaça e 260 kg de bagaço de cana, reforça-se a ideia de se destinarem adequadamente esses resíduos [JENDIROBA, 2006]. Esses números, que já são altos, devem aumentar consideravelmente nos próximos anos com o incremento no mercado consumidor de álcool, a expansão das lavouras de cana-de-açúcar e o funcionamento de novas unidades agroindustriais [SPADOTTO, 2007].

As etapas do processo de corte da cana-de-açúcar até a queima do bagaço em caldeira são mostradas na Figura 2.7. Após o corte (a), a cana-de-açúcar é transportada para a unidade

industrial (b), onde é lavada (c) para retirar a terra e impurezas provenientes da lavoura. Em seguida, é desfibrada (d) e enviada à moenda para extração do caldo. Em geral, cerca de 96% do açúcar contido na cana é extraído. O bagaço resultante, com cerca de 4% de açúcar e umidade média em torno de 50%, é transportado da moenda para depósitos a céu aberto (e, f) onde permanece até a disposição final, que pode ser a queima em caldeira, devolução às lavouras ou vendido a outras indústrias do setor, quando sua produção é maior que a capacidade de queima na caldeira [SOUZA et al., 2007.].



**Figura 2.7.** Cana-de-açúcar: corte, moagem, produção e queima do bagaço. Fonte: Souza et al., 2007.

Os impactos da atividade sucroalcooleira no meio ambiente devem ser considerados em relação à produção agrícola e à produção industrial. Esses impactos incluem a poluição do ar (localmente) com a queimada da cana e com o uso do etanol combustível; as emissões de gases de efeito estufa, em todo o ciclo de vida da cana-de-açúcar; os impactos do uso de novas áreas para plantio, inclusive na biodiversidade; os impactos na conservação do solo e a sua erosão; no uso de recursos hídricos e na qualidade da água; e no uso de defensivos e fertilizantes [RELATÓRIO UNICA, 2005].

Pode se considerar que a produção agrícola da cana-de-açúcar no Brasil, atualmente, apresenta baixos impactos ambientais: i) usa baixo nível de defensivos; ii) tem um importante programa de controle biológico de pragas; iii) tem o menor índice de erosão do solo da agricultura brasileira; iv) recicla todos os seus resíduos; v) não compromete a qualidade dos

recursos hídricos; e vi) participa ativamente de inovações, por exemplo, apresentando a maior área de produção orgânica do país [ROSSETTO, 2004<sup>1</sup> apud RELATÓRIO UNICA, 2005].

Ainda assim, há que se considerar o aspecto da poluição do ar ocasionado pelas queimadas que antecedem a colheita manual. A queima da palha da cana-de-açúcar é uma prática usual em quase todos os 97 países que a produzem. Essa queima tem por objetivo aumentar a segurança do trabalhador e o rendimento do corte pela eliminação da palha e folhas secas [RELATÓRIO ÚNICA, 2005].

O uso do etanol (puro ou em mistura) tem levado a diminuição dos compostos de chumbo, provenientes da gasolina e do enxofre, e das emissões de CO, melhorando a qualidade do ar nos centros urbanos. O controle dos efeitos indesejáveis das queimadas (sujeira e riscos de acidentes) está ocorrendo eficientemente de maneira progressiva, dentro da legislação vigente.

A incineração de biomassa é a maior fonte doméstica de energia nos países em desenvolvimento. Aproximadamente metade da população do planeta, e mais de 90% das casas na região rural dos países em desenvolvimento, permanecem utilizando energia proveniente da queima de biomassa, na forma de madeira, carvão, esterco de animais ou resíduos agrícolas [ARBEX et al., 2004].

Em um estudo sobre os efeitos das queimadas de cana-de-açúcar e a emissão de elemento particulado negro (fuligem da cana) na cidade de Piracicaba, os resultados indicaram que a queima de biomassa e a suspensão do material erodido do solo foram responsáveis por 80% do material particulado fino PM<sub>2,5</sub> quantificado<sup>2</sup>. O risco relativo de internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças e adolescentes foi significativamente influenciado pela variação da concentração de vários poluentes na atmosfera. A um aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> no PM<sub>2,5</sub> foi associado a um aumento de 21,4% nas internações por doenças respiratórias em crianças e adolescentes.

Segundo o Jornal da Ciência [2007], a atividade de queima da palha da cana deverá ser 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

---

<sup>1</sup> ROSSETTO, R. A cultura da cana, da degradação à conservação. **Visão Agrícola**, ESALQ-USP, Ano 1, jan 2004

<sup>2</sup> Material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm. Fonte: Arbex et al., 2004.

maio de 2007, antecipando o limite anterior (que era em 2031), imposto por Lei Estadual criada para eliminar gradativamente as queimadas de cana, que, feitas geralmente à noite, são necessárias para viabilizar o corte manual no dia seguinte. Atualmente, 50% da colheita já está sendo mecanizada no estado de São Paulo [REVISTA ABENDE, 2008].

Se por um lado a extinção das queimadas pode minimizar um problema ambiental, por outro leva a um enorme contingente de desempregados que não serão totalmente absorvidos por outros setores produtivos. Apenas na atividade de corte da cana, há cerca de 30 mil trabalhadores no Estado de São Paulo, um trabalho insalubre, que muitas vezes leva muitas pessoas à morte [ALESSI e NAVARRO, 1997].

A demanda de mão-de-obra na produção de cana-de-açúcar deverá ser reduzida pelo aumento da mecanização da colheita e do plantio. Esta redução será apenas parcialmente compensada pela provável introdução de processos de recolhimento da palha no campo para geração de energia [RELATÓRIO ÚNICA, 2005].

Apesar das possíveis consequências socioeconômicas decorrentes da mecanização nas regiões canavieiras, vários aspectos favoráveis ao corte de cana-de-açúcar sem queima podem ser destacados. Além de evitar as emissões dos gases de efeito estufa, a prática de colheita de cana crua leva ao aumento na quantidade de cobertura vegetal do solo nas soqueiras (restos de raízes de cana), o que diminui a erosão do solo e aumenta a infiltração de água; também há uma melhoria na qualidade tecnológica das máquinas, o que evitaria a perda de energia, apesar do menor rendimento de corte e da maior quantidade de impurezas vegetais [FIESP/CIESP, 2001].

A proposição de um novo valor agregado aos resíduos da cana-de-açúcar pode gerar a expectativa de novos postos de trabalho e a criação de um novo nicho econômico para os subprodutos da indústria sucroalcooleira brasileira. Ainda que exista a utilização do bagaço como fonte viável de energia por meio da cogeração, a cultura da cana-de-açúcar produz outros resíduos, alguns até em maior volume que o bagaço.

De todos os resíduos da unidade industrial sucroalcooleira, o bagaço é um dos mais atrativos, apesar de não ser o de maior volume, por causa de seu poder calorífico inferior médio<sup>3</sup> de 7,74 MJ/kg (1850 kcal/kg), servindo de combustível para todo o processo produtivo da fabricação do açúcar e do álcool [CORDEIRO, 2006; SOUZA et al., 2007].

A vinhaça da cana-de-açúcar, no entanto, é o resíduo de maior volume gerado pela indústria sucroalcooleira. Apresenta-se como um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácida, que sai da bica de destilação à temperatura de aproximadamente 107 °C, com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo. Essa qualidade está relacionada ao teor residual de açúcar o qual, por sua vez, provoca um processo de putrefação tão logo a vinhaça é descarregada [FREIRE, 2000].

Principal efluente das destilarias de álcool, a vinhaça apresenta elevada DBO (Demanda Bioquímica por Oxigênio) e é produzida, em média, à razão de 13 litros por litro de álcool destilado. Todavia, se por um lado a vinhaça apresenta elevado potencial poluidor, por outro atribui-se a esse resíduo um alto valor fertilizante [FREIRE, 2000].

No início da produção de álcool, a vinhaça antes era lançada diretamente nos rios, causando grandes problemas ambientais. Atualmente, devido a pesquisas aplicadas nessa área, a vinhaça é, em grande parte, aproveitada para irrigar e fertilizar lavouras de cana-de-açúcar. Porém, vale notar que essa utilização também merece atenção quanto a possíveis problemas de degradação e contaminação do solo e da água [SPADOTTO, 2007].

Muitos trabalhos foram desenvolvidos objetivando a utilização da vinhaça como fertilizante para uso no solo. Os teores de potássio e de matéria orgânica reforçaram essa possibilidade de uso e a irrigação beneficiou a lavoura em períodos críticos de redução de umidade e precipitação volumétrica [JENDIROBA, 2006].

Outro resíduo líquido resultante da fabricação do açúcar e do álcool é a água de lavagem da cana-de-açúcar, que carrega impurezas como areia, argila, palha, pedra, entre outros. O

---

<sup>3</sup> O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor que se desprende durante a combustão completa da unidade de massa do combustível. Considera-se poder calorífico inferior quando não se leva em conta o aproveitamento do calor latente de condensação de vapor d'água presente nos gases de combustão, proveniente da umidade da biomassa e da própria combustão. Fonte: Cordeiro, 2006.

consumo de água para lavagem varia de 2 a 10 m<sup>3</sup> por tonelada de cana lavada [FREIRE, 2000].

A torta de filtro, outro resíduo importante, é um material orgânico sólido gerado na produção de açúcar, proveniente da clarificação do caldo e da purificação. A análise desse material revelou uma concentração de fósforo que se tornou atrativa para uso como adubo. A torta de filtro tem sido utilizada na adubação do plantio dos canaviais, sendo distribuída ao longo dos sulcos de plantio em dosagens que variam entre 10 a 15 toneladas por hectare [FREIRE, 2000; JENDIROBA, 2006].

Atualmente, toda a torta de filtro produzida é integralmente utilizada na adubação da lavoura de cana, sendo, em alguns casos, enriquecida com outros produtos para melhorar a nutrição das plantas. Em alguns sistemas, junto à torta de filtro, são incorporadas as cinzas de caldeira e a fuligem da filtração dos gases emitidos para a atmosfera. Esses resíduos também são gerados em quantidades consideráveis e tornam-se problemáticos se forem armazenados na unidade industrial [JENDIROBA, 2006].

Ramalho e Sobrinho [2001] pesquisaram amostras de um solo gley pouco húmico, antiga lagoa de vinhaça, e dois cambissolos, um fertirrigado com vinhaça e outro com aplicação de torta de filtro, cultivados com cana-de-açúcar. A utilização da vinhaça em larga escala, não alterou significativamente os teores de metais pesados nos solos pesquisados. O uso da torta de filtro no solo cambissolo, durante 20 anos, acarretou aumentos significativos dos teores totais de cádmio, chumbo, cobalto, cromo, cobre e níquel, apesar desses metais estarem em formas químicas pouco móveis e indisponíveis para absorção pelas plantas.

Nota-se, portanto, que o setor sucroalcooleiro está sempre buscando utilizar seus resíduos nas mais variadas atividades inerentes ao cultivo, colheita e processamento da cana, ainda que haja ressalvas em algumas dessas práticas.

Atualmente, a destinação da CBC é um dos problemas enfrentados pelos administradores das usinas. A fuligem gerada no processo é recolhida a partir de técnicas de lavagem e decantação e, juntamente com a cinza de caldeira, constituem-se em resíduos finais do processo industrial, etapa na qual não há possibilidade de redução do resíduo [JENDIROBA, 2006; SOUZA et al., 2007].

Manhães [1999] atestou que a CBC, além de ser de difícil degradação, possui poucos nutrientes minerais. No entanto, na maior parte dos casos, as cinzas residuais são aproveitadas no campo como adubação orgânica ou descartadas na natureza sem um manejo eficiente [Figura 2.8].



**Figura 2.8.** Disposição final da CBC. Fonte: Souza et al., 2007.

Para cada tonelada de bagaço que alimenta o processo de cogeração, são gerados, aproximadamente, 24 kg de cinza residual [FIESP/CIESP, 2001]. As características da cinza são influenciadas pelas condições de queima do bagaço. Na Figura 2.9 pode-se observar o bagaço e as cinzas produzidas nas caldeiras com tons mais escuros, que caracterizam cinzas com alto teor de carbono, e com tons mais brancos, que indicam a combustão completa.



**Figura 2.9.** Bagaço de cana-de-açúcar [a] e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta [b], cinza com menor teor de carbono [c] e cinza gerada após a combustão completa [d]. Fonte: CORDEIRO, 2006.

O bagaço possui boa ignição, apesar de normalmente apresentar um elevado teor de umidade. A umidade do bagaço que alimenta as caldeiras interfere diretamente no rendimento da combustão e nas características da cinza gerada.

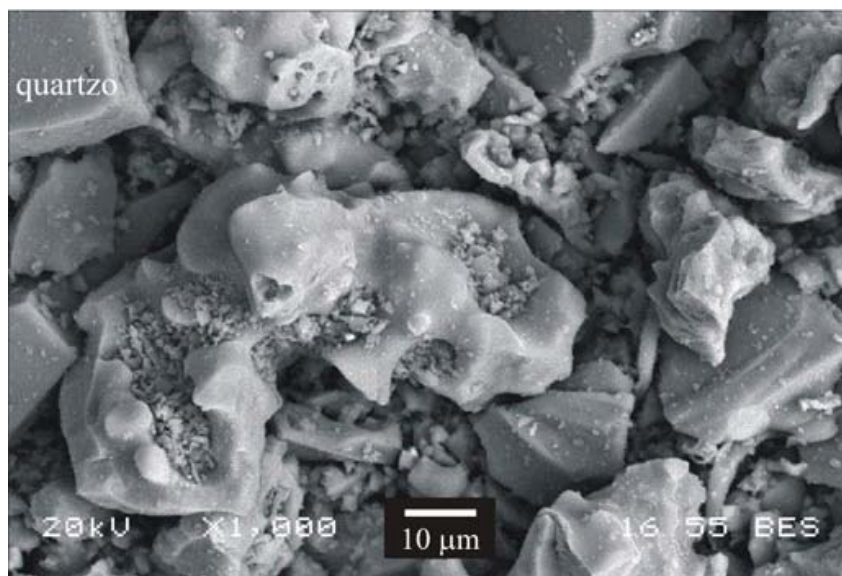
De acordo com Coelho [1999], para um teor de umidade de 50% a temperatura de ignição do bagaço está entre 500 °C e 600 °C, faixa que cai para 300 °C a 400 °C quando a umidade encontra-se entre 35% e 40%. A temperatura da chama também é sensível à umidade e seu valor varia normalmente entre 850 °C e 920 °C com 50% umidade, mas pode alcançar valores acima de 1000 °C quando a umidade é inferior a 35%. Nos estudos de Payá et al. [2002], a CBC pesquisada, com temperatura de queima superior a 800 °C, apresentou elevada cristalinidade, com picos de quartzo e mulita.

Segundo Paula [2006], a incineração do bagaço de cana-de-açúcar em condições não controladas gera cinza que pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica. Além disso, a quantidade de carbono tem grande influência na absorção de água, pois o material carbonoso é extremamente fino, ocasionando um aumento na demanda de água [MACEDO et al., 2009].

A cinza do bagaço apresenta, em termos de óxidos, uma grande quantidade de dióxido de silício, normalmente acima de 60% (em massa). O silício é absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossílico ( $H_4SiO_4$ ) e, após a saída da água das plantas por transpiração, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel. O acúmulo de silício entre a cutícula e a parede das células da epiderme funciona como uma barreira física à penetração de fungos patogênicos e reduz as perdas de água por transpiração [BARBOZA FILHO e PRABHU, 2002].

Outra possível fonte de sílica para a cinza é a areia (quartzo), oriunda da lavoura, que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem no processamento da cana-de-açúcar. Esta areia permanece no bagaço e pode ser observada nas operações de limpeza dos salões das caldeiras, onde ocorre a combustão [CORDEIRO, 2006; CORDEIRO et al., 2008]. Na Figura 2.10, pode-se observar a morfologia das partículas da cinza do bagaço, com destaque para a estrutura celular altamente porosa e a contaminação do material por partículas de quartzo (areia natural).





**Figura 2.10.** Morfologia das partículas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Fonte: Cordeiro, 2006.

John et al. [1996] afirmaram 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.

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.

Somente na safra 2010/2011, a produção de CBC ultrapassaria as 40 toneladas diárias, caso todo o bagaço de cana-de-açúcar fosse transformado em cinza com o objetivo de geração de energia. Atualmente, a maior parte desse volume de cinza é disposto no meio ambiente sem um manejo eficiente, e como se trata de um material de difícil degradação, pode permanecer em depósitos ao ar livre por longos períodos.

A proposição de um novo uso para a CBC, no contexto da construção civil, vai ao encontro da necessidade de se buscarem novas destinações adequadas para o resíduo do bagaço, uma vez que a produção de cana-de-açúcar, no centro-sul do Brasil, está atingindo recordes de colheita nos últimos anos, e pode ultrapassar as 700.000.000 toneladas antes do final do ano de 2012.

## **2.2. A substituição de agregados miúdos por resíduos**

A produção de qualquer insumo gera resíduo. Tudo que nos cerca um dia será resíduo: casas, automóveis, móveis, pontes, aviões, etc. A esse total, devem ser somados todos os resíduos do processo de extração de matérias-primas e de produção dos bens. Assim, em qualquer sociedade, a quantidade de resíduos gerados supera a quantidade de bens consumidos. A sociedade industrial agravou esse processo ao multiplicar a produção de bens [ROCHA e CHERIAF, 2003].

Ainda que a produção de resíduos sólidos faça parte do cotidiano do ser humano, na qual não se pode imaginar um modo de vida que não gere resíduos, estes, quando manejados inadequadamente, podem oferecer alimento e abrigo para muitos vetores de doenças relacionadas com a falta de saneamento e tratamento de resíduos [MOTA, 2003; PHILIPPI Jr e AGUIAR, 2005; IBGE, 2007].

Mesmo assim, apenas uma pequena parcela desses resíduos tem recebido tratamento ou destinação adequada e permanecem armazenados nas próprias instalações onde foram gerados podendo causar danos ao meio ambiente. A indústria da Construção Civil apresenta-se com um grande potencial para a solução desses problemas, pela viabilidade que apresenta de incorporação desses resíduos nos materiais de construção, desde que analisadas as suas propriedades, o que possibilita ainda, redução nos custos desses produtos [ROCHA e CHERIAF, 2003].

Segundo John et al. [2003] a construção civil é, por sua própria natureza, o segmento que apresenta maior capacidade de absorver novas tecnologias e novos materiais, produzidos e desenvolvidos a partir da utilização de resíduos.

De todos os segmentos da Construção Civil, apesar ainda dos baixos níveis de desempenho, o que mais se desenvolveu e que teve mais abrangência quanto à aplicação dos conceitos de sustentabilidade, foi o de materiais e componentes da construção, principalmente os que usam o cimento Portland como matriz.

Segundo Daniali [1990], por exemplo, a fixação de resíduos sólidos perigosos em matriz de cimento Portland é a técnica de estabilização/solidificação mais comumente utilizada devido à simplicidade do processo e ao baixo custo.

Dentre as vantagens da utilização da técnica S/S à base de cimento Portland, compiladas por Pablos e Sichieri [2007], tem-se que o cimento Portland e os equipamentos utilizados têm custos relativamente baratos e o consumo de energia é baixo; e a secagem e a desidratação do resíduo não são necessárias, visto que o cimento precisa de água para sua hidratação e posterior endurecimento. Tem-se ainda que o sistema é tolerante à maioria das variações químicas, uma vez que o cimento, dada a sua alcalinidade, pode neutralizar ácidos e não é afetado por oxidantes fortes, tais como nitratos.

Complementarmente ao fato de absorver os mais diferentes resíduos, as atividades relacionadas à indústria da Construção Civil possuem um enorme impacto ambiental pelo grande consumo de recursos naturais. Estima-se que esse setor consuma entre 20% e 50% do total de recursos naturais utilizado pelas atividades industriais [JOHN, 1999]. Além disso, a atividade de construção também gera muitos resíduos sólidos em suas atividades, denominados de RCD – Resíduos de Construção e Demolição.

Além da geração de resíduos, os processos de produção de materiais e componentes em geral consomem grandes quantidades de energia e são responsáveis também pela geração de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> e de partículas de poeira.

Em recente entrevista em periódico técnico especializado, Povindar Kumar Mehta defendeu um menor consumo de concreto nas novas estruturas, além de menos cimento nas misturas para concreto e o uso de pouco clínquer para produzir cimento. O especialista propôs que se substituísse parte da massa de clínquer por cinzas residuais e/ou pozolanas naturais. Ele fez, ainda, uma comparação abstrata entre o concreto e o deus *Shiva* da mitologia hindu, atestando que o concreto é um material capaz de absorver a enorme quantidade de resíduos gerados pela sociedade [REVISTA TÉCHNE, 2008].

### 2.2.1 Os agregados naturais

Por todos os motivos explicitados sobre a capacidade da construção civil de absorver resíduos em seus processos, vários estudos estão sendo realizados com o objetivo de substituir as matérias-primas da construção civil (cimento e agregados) por resíduos industriais e urbanos.

John [1996] apontou que o aproveitamento de resíduos [industriais e agroindustriais] como material de construção é opção de proteção ambiental bastante relevante. Afirmou ainda, que essa contribuição pode ser importante mesmo quando se trata da substituição de recursos naturais abundantes, no caso dos agregados naturais.

Os agregados são considerados produtos básicos para a indústria da construção civil, apresentando, quando utilizado para confecção de concreto, consumo médio (por m<sup>3</sup>) de 42% de agregado graúdo, 40% de agregado miúdo, 10% de cimento, 7% de água e 0-1% de aditivos [LIMA, 1999].

Como se observa, cerca de 70-80% do concreto é constituído de agregados, decorrendo daí a importância do uso de agregados com especificações técnicas adequadas e custo competitivo, que permita a obtenção de um concreto a preço compatível com o uso a que se destina, com característica técnica de resistência e durabilidade, capaz de concorrer com os outros materiais de natureza estrutural utilizados na construção civil.

A produção de areia e pedra britada caracteriza-se pelo baixo valor unitário e pela produção de grandes volumes. O transporte corresponde a cerca de 65% do custo final do produto, o que impõe a necessidade de ser produzido o mais próximo possível do mercado consumidor. Em regiões metropolitanas, como as de São Paulo e Rio de Janeiro, quase toda a areia consumida pela construção civil está sujeita a transporte por distâncias de até 100 km [SILVA FILHO et al., 2002].

Segundo o último Anuário Mineral Brasileiro, data base 2005, a produção de areia bruta no Brasil foi de mais de 210 milhões de toneladas. Os setores que mais consumiram a areia em suas atividades foram a construção civil (61,94%), o comércio de materiais de construção (0,91%) e a produção de argamassas para construção (0,28%), totalizando 133,2 milhões de toneladas de areia.

O estado de São Paulo respondeu por cerca de 30% da produção nacional de pedra britada. Em relação a areia, os Estados que se destacam como principais pólos produtores são: São Paulo, nas regiões do Vale do Paraíba do Sul; Rio de Janeiro, em Seropédica e Itaguaí; Rio Grande do Sul, nos rios Guaíba, Caí e Jacuí; Santa Catarina, no vale do rio Itajaí; e Curitiba, na várzea do rio Iguaçu na região metropolitana [DNPM, 2006].

A extração de areia e pedra britada para uso na construção civil constitui uma atividade mineradora, e como acontece, normalmente, com toda atividade de mineração, trata-se de empreendimento exploratório que degrada o meio ambiente. No entanto, se não houver areia e brita, a indústria da construção civil torna-se inviável, constituindo grave problema econômico e social, já que se trata de grande empregadora de mão de obra.

As atividades de extração mineral são de grande importância para o desenvolvimento social, mas também são responsáveis por impactos ambientais negativos muitas vezes irreversíveis. Estes se tornam mais visíveis com a dinamização do processo de industrialização e o crescimento das cidades, que aceleram os conflitos entre a necessidade de buscar matérias-primas e a conservação do meio ambiente [LELLES et al., 2005].

Os principais impactos ambientais que podem ser causados pela extração mineral de agregados são a alteração da paisagem; a supressão da vegetação, principalmente da mata ciliar; a alteração na calha dos cursos d'água; e a instabilidade de margens e taludes. Na Figura 2.11 pode-se observar uma área de extração de areia, na qual se nota o grau de destruição da paisagem natural.



**Figura 2.11.** Local de extração de areia para construção civil em Seropédica, RJ.  
Fonte: <<http://www.drm.rj.gov.br>>

A areia é extraída em unidades de mineração, chamadas de areais ou portos de areia, e pode ser extraída do leito de rios, depósitos lacustres, veios de areia subterrâneos (minas) ou de dunas. A maior parte da areia produzida no Brasil é de leito de rios ou extraída de minas, com formação de cavas inundadas pelo lençol freático. Na Figura 2.12 pode-se observar um exemplo do sistema de mineração de areia em corpos d'água.



**Figura 2.12.** Sistema de mineração da areia extraída de rios: (a) e (b) barcaça extraíndo a areia; c) silo de estocagem de areia; e d) separação e controle no areal. Fonte: RODRIGUES, 2005.

A areia, juntamente com a água, é bombeada para silos suspensos, ou então, acumulada no terreno, para posteriormente ser embarcada em caminhões basculantes com destino ao distribuidor ou ao consumidor final.

A mineração da areia em leitos de rios é responsável por 90% da produção brasileira; no Estado de São Paulo, a relação é de 45% proveniente de várzeas, 35% de leitos de rios e o restante de outras fontes [DNPM, 2006].

### **2.2.2. A substituição de areia natural por resíduos**

Por conta dos riscos ambientais inerentes a extração de areia natural, várias pesquisas têm sido desenvolvidas sobre a viabilidade da substituição de agregado miúdo natural por resíduos

de origem diversa. Porém, o principal resíduo a ser estudado como substituto dos agregados é o resíduo de demolição e construção, proveniente diretamente das várias etapas da construção civil.

A Resolução do CONAMA nº 307/2002 estabelece que resíduos da construção civil (RCDs) são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Os RCDs são considerados e tratados como Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Entretanto, devem ser gerenciados considerando-se que estes são, em sua maioria, formados por materiais inertes, com elevado volume e/ou peso específico e com grande potencial de reaproveitamento e reciclagem [PINTO, 2005].

A ineficiente gestão desses resíduos pode significar desperdício de material e extração de recursos naturais não renováveis, poluição devido ao descarte inadequado e prejuízos econômicos para as Prefeituras, que lidam com alguns problemas relacionados a esses resíduos: enchentes por entupimento das galerias pluviais; contaminação de rios e riachos devido à deposição irregular de RCDs nas regiões ribeirinhas; favorecimento da proliferação de vetores e doenças, além do alto custo para limpeza de terrenos e a diminuição da vida útil dos aterros sanitários [FERNANDES e PIMENTEL, 2011].

Em diversos países a variação da porcentagem da reciclagem dos RCD é definida em função da disponibilidade dos recursos naturais, distância de transporte entre reciclados e materiais naturais, situação econômica e tecnológica do país, bem como da densidade populacional. O RCD é utilizado, no Brasil, principalmente como substituto dos agregados, em argamassas, concretos e blocos, e como base para pavimentação urbana [DORSTHORST e HENDRIKS, 2000].

Outros resíduos, de diferentes origens, também têm sido estudados como substituto dos agregados miúdos em concretos e argamassas.

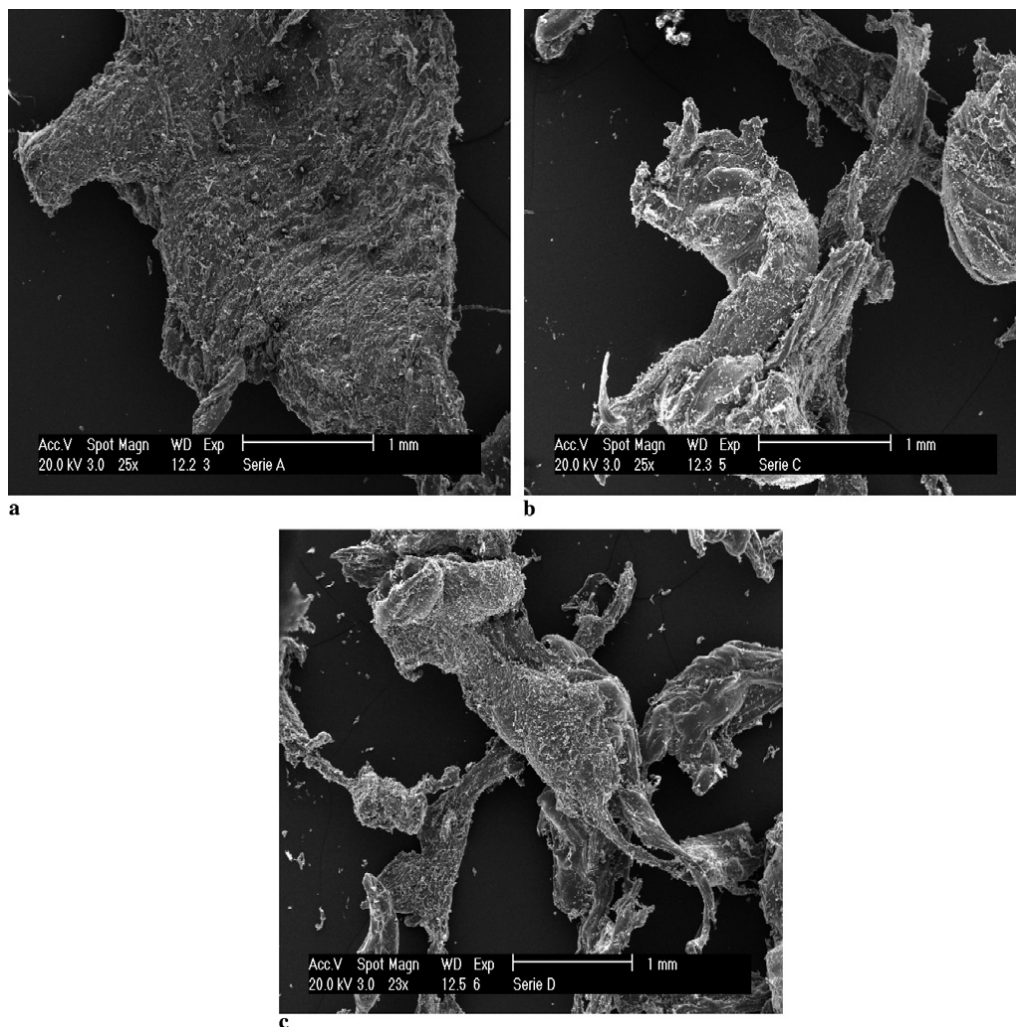
Faria et al. [2005] pesquisaram o uso de resíduos sólidos da indústria química, a argila montmorillonítica, na substituição da areia em argamassas, concluindo que a mesma pode ser utilizada em teores de 5% de substituição sem comprometimento da resistência mecânica.

Em outro trabalho, Canellas [2005] investigou o uso de material granulado proveniente de garrafas PET em substituição do agregado miúdo, concluindo ser possível a substituição de 30% de areia por resíduos de PET sem perdas significativas na plasticidade e nos valores de resistência à compressão e à tração. A autora afirmou que o compósito obtido tem potencial para ser utilizado na confecção de artefatos de concreto, sem grande responsabilidade estrutural, e em artefatos de mobiliário urbano, além de seu uso permitir uma economia significativa de volumes de areia lavada, um recurso natural cuja extração tem causado grandes danos ao ecossistema dos rios e suas margens.

Em outra pesquisa utilizando PET granulado em substituição a areia em argamassas, Marzouk et al. [2007] utilizaram três tipos de resíduo moído, tipo A, tipo B e tipo C com tamanhos máximos de 5 mm, 2 mm e 1 mm, respectivamente [Figura 2.13].

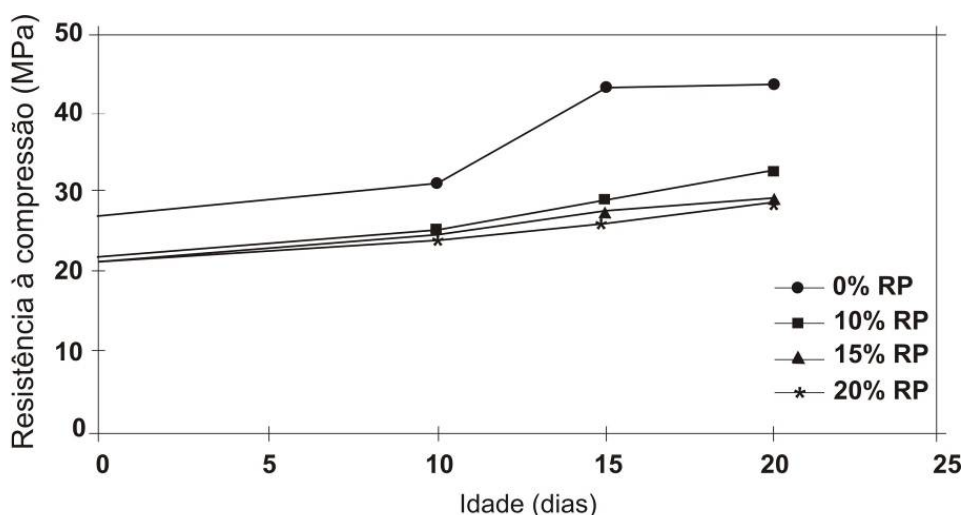
Os resultados mostraram que as propriedades de resistência à compressão e à flexão dos concretos não foram prejudicadas com a substituição de até 50% de resíduo de PET por areia. Os autores também comprovaram que a zona de transição matriz-resíduo não foi alterada com a substituição do agregado miúdo por PET.





**Figura 2.13.** Micrografias de várias partículas de resíduo de PET. [a] Tipo A; [b] Tipo C; [c] Tipo D. Fonte: Ismail e Al-Hashmi, 2008a (adaptado).

Ismail e Al-Hashmi [2008a] estudaram a substituição de resíduos de plásticos não-biodegradáveis (80% polietileno e 20% poliestireno) por agregado miúdo, em teores de 10%, 15% e 20%, para a produção de concretos. Os valores do ensaio de resistência à compressão das misturas com resíduos ficaram abaixo dos valores de referência para todas as idades analisadas. Tal fato, segundo os autores, pode ser atribuído à perda de resistência na zona de transição resíduo-matriz [Figura 2.14].



**Figura 2.14.** Resistência à compressão dos corpos de prova em concreto com substituição de areia por RP. Fonte: Ismail e Al-Hashmi, 2008a (adaptado).

Ismail e Al-Hashmi [2008b] também estudaram a substituição de resíduos de ferro na substituição por areia em concretos. O resíduo de ferro é um dos principais problemas ambientais no Iraque [Figura 2.15]. As características físicas do resíduo foram: i) massa específica -  $4,50 \text{ kg/m}^3$ ; ii) massa unitária -  $1946,70 \text{ kg/m}^3$ ; e iii) módulo de finura - 2.65.



**Figura 2.15.** Resíduo de ferro usado como substituto da areia. Fonte: Ismail e Al-Hashmi, 2008b

Os concretos foram produzidos com substituição de areia por resíduo de ferro em 10%, 15% e 20% com a mesma relação água/cimento para todas as amostras, no valor de 0,53. As idades analisadas foram aos 3, 7, 14 e 28 dias. Entre outros resultados, os autores destacam o aumento de 37,98% e 28,34% na resistência à compressão das amostras produzidas com

substituição de 20% de resíduo de ferro por areia, aos 3 e 7 dias, respectivamente, em comparação com a amostra de referência.

Em outro trabalho, Ismail e Al-Hashmi [2009] testaram a substituição de resíduos de vidro, provenientes de embalagens, garrafas e esquadrias, pelo agregado miúdo na produção de concretos. O resultado do ensaio de resistência à compressão e à flexão dos prismas mostrou que a substituição de até 20%, em massa, de areia por resíduo não alterou as propriedades, e em alguns teores, até superou as amostras de referência [Tabela 2.4].

**Tabela 2.4.** Resistência à compressão dos concretos confeccionados com resíduo de vidro

% Resíduo de vidro	Idade (dias) / Resistência à compressão (MPa)			
	3	7	14	28
0%	26,9	31,5	43,8	44,0
10%	29,1	34,6	39,1	40,3
15%	28,9	32,0	38,3	42,0
20%	27,6	31,7	38,0	45,9

Fonte: Ismail e Al-Hashmi, 2009 (adaptado).

Os autores atestaram a diminuição nos valores da a massa específica no estado fresco das amostras produzidas com 10%, 15%, e 20% de resíduo de vidro foram de 1,28%, 1,96%, e 2,26%, respectivamente. Essa diminuição pode ser atribuída à densidade do resíduo de vidro, aproximadamente 14,8% menor que a da areia.

Oliveira et al. [2007] estudaram o uso de pó de mármore como substituto da areia natural em argamassas de assentamento. Os resultados mostraram que o pó de mármore apresentou desempenho melhor que a areia de rio em todos os ensaios. O aumento dos valores de resistência à compressão foi da ordem de 20% e do módulo de elasticidade que foi da ordem de 30%, em relação às argamassas produzidas com areia natural.

Em outro trabalho, Limbachiya [2009] estudou a substituição de resíduos de vidro (RV) como substituto da areia em concretos. Foram avaliadas as propriedades no estado fresco, a resistência à compressão, retração e módulo de elasticidade de concretos com teores de substituição de 0%, 10%, 15%, 20%, 30% e 50%, em massa.

Os resultados mostraram que a substituição de até 20% de RV por areia não alterou os valores de resistência à compressão dos concretos. Porém, para teores maiores, houve uma diminuição gradual dos valores com o aumento do teor de substituição. A diferença nos valores de resistência entre o concreto de referência e o concreto com 50% de RV, para a resistência de dosagem no valor de  $20 \text{ N/mm}^2$ , foi 31% maior, enquanto que para a resistência de dosagem no valor de  $40 \text{ N/mm}^2$ , o valor de referência foi 20% maior.

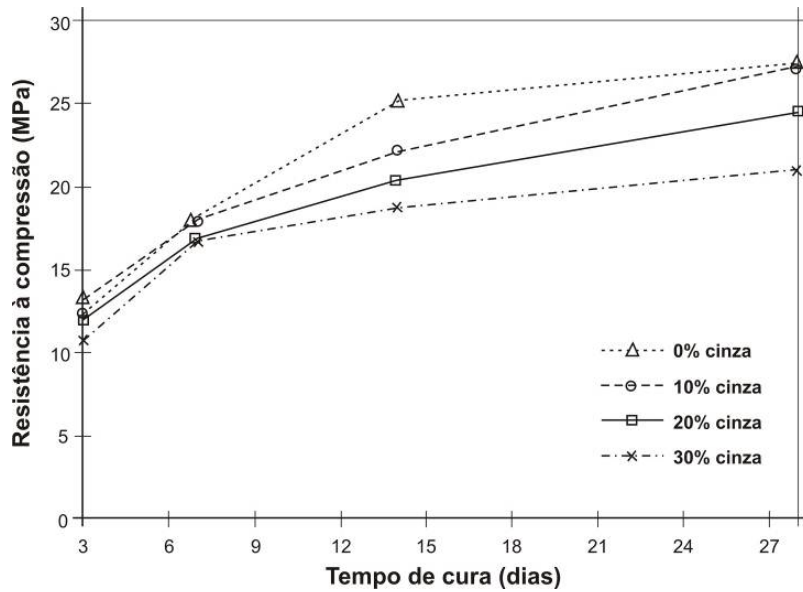
Freitas et al. [2009] aplicou raspas de borracha vulcanizada proveniente da indústria de remoldagem de pneus como substituto do agregado miúdo. Foram dosados os traços do concreto referência (CR) e dos concretos com adição de 5%, em peso, CAB 5; 10% - CAB 10; e 15% de borracha - CAB 15. O teor de água foi mantido constante e a adição de plastificante foi variada em acordo com o teor de borracha substituído. Os autores concluíram que a adição do resíduo de borracha em substituição à areia diminuiu a trabalhabilidade do concreto. A resistência mecânica do CAB 15 foi 48,3% menor que o CR, com valor de  $16,9 \pm 1,1 \text{ MPa}$ .

Outro resíduo, atualmente investigado como substituto da areia, é o resíduo sólido municipal (lixo urbano). Esse resíduo representa um grande problema ambiental em cidades que carecem de espaço para implantação de aterros e, por isso, precisam incinerar o lixo orgânico. Esse tipo de pós-tratamento de resíduos possui muitas vantagens, entre elas o fato de reduzir o volume do lixo em até 90%. Há, porém, o problema de se produzir um novo resíduo, que são as cinzas provenientes da incineração.

Al-Rawas et al. [2005] utilizaram cinzas provenientes da queima de resíduo sólido municipal (RSMI) por areia e cimento na produção de concretos. Foram utilizados teores de substituição de 0%, 10%, 20% e 30%, com relação a/c constante no valor de 0,70. Outros valores de fator a/c foram testados anteriormente, mas produziram concretos com baixa trabalhabilidade, o que fez com que os pesquisadores tivessem que a aumentar a quantidade de água das misturas.

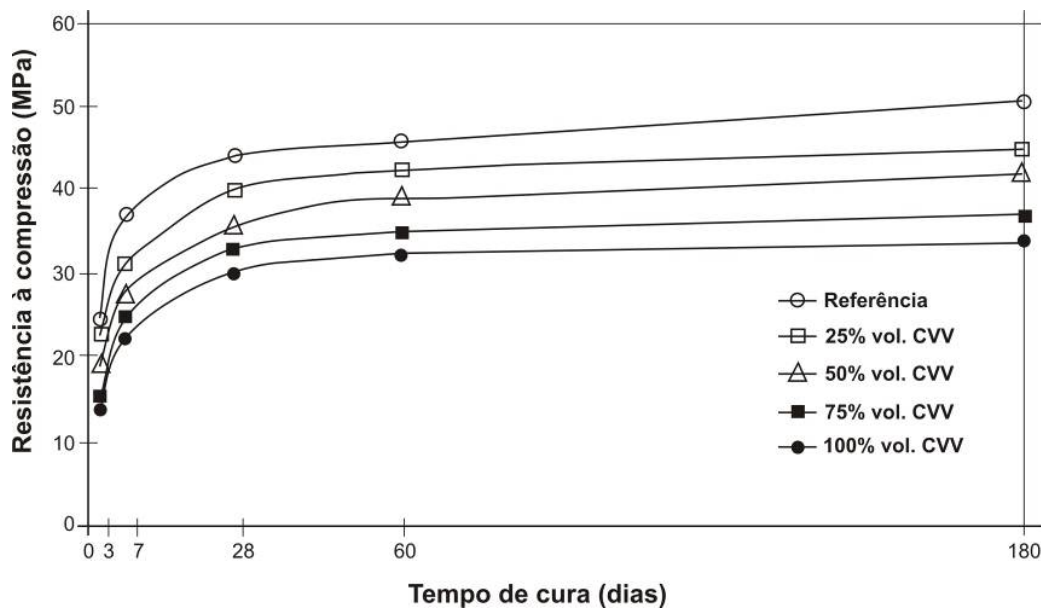
Os resultados mostraram que os exemplares com 20% de substituição de areia por RSMI apresentaram o maior valor de resistência à compressão, no valor de 36,4 MPa, aos 28 dias. A amostra produzida com 30% de RSMI apresentou um aumento pouco significativo em relação ao exemplar com 20% de substituição, aos 3 e 7 dias apenas, o que levou os autores a concluir

que, economicamente e tecnicamente, o valor de 20% é o mais indicado para o traço utilizado [Figura 2.16].



**Figura 2.16.** Resistência à compressão de argamassas com substituição de areia por RSMI. Fonte: Al-Rawas et al., 2005 (adaptado).

Ferraris et al. [2009] também estudaram o resíduo sólido municipal incinerado (RSMI) na produção de concretos e argamassas e os resultados mostraram que a resistência à compressão aumentou nas amostras com cinza volante vitrificada (CVV), como mostra a Figura 2.17.



**Figura 2.17.** Resistência à compressão de argamassas com substituição de areia por CVV. Fonte: Ferraris et al., 2009 (adaptado).

O RSMI foi utilizado como substituto parcial e/ou total da areia, cimento e como material fíler. Como pré-tratamento, o RSMI foi aquecido a uma temperatura de 1450 °C e transformado em CVV. Esse resíduo foi utilizado como substituto da areia em teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, em volume, com fator a/c no valor de 0,60, para produção de argamassas.

### **2.3. O uso das cinzas em argamassas e concretos**

As cinzas, um tipo de resíduo de origem industrial ou agroindustrial, também têm sido analisados quanto à substituição dos agregados miúdos.

Todas as cinzas são subprodutos diretos de atividades industriais e/ou agroindustriais e podem também ser originadas da queima de outros resíduos, devido à reincorporação destes no processo onde são geradas. 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 por serem geradas no final da cadeia produtiva [CINCOTTO, 1988].

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. Sua reatividade vai depender da composição química, bastante influenciada pelo produto que gerou a cinza, pelo solo e pelo processo de produção da cinza. Uma vez que contenham elevado teor de sílica amorfa, podem ser de utilização viável como adição mineral [JOHN et al., 2003].

A tecnologia do uso das cinzas na construção civil, investigada com êxito por vários autores, serve de embasamento para o desenvolvimento da pesquisa com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, na busca da consolidação deste produto como atual e viável na produção de elementos para construção civil. Dessa forma, poder-se-ia evitar os problemas consequentes da sua má disposição, utilizando-a como matéria-prima no desenvolvimento de tecnologias alternativas para a construção civil e para a infraestrutura das cidades.

Outro fator relevante referente às adições minerais deve-se à sua composição física (estado amorfo ou cristalino). Caso apresentem reatividade em meio aquoso com o CH (hidróxido de cálcio), resultando em endurecimento, podem ser utilizados como adição mineral pozolânica em substituição parcial ou total ao cimento Portland [JOHN et al., 2003].

Do ponto de vista técnico, as adições minerais podem melhorar a qualidade do concreto, além de terem custos e preços menores quando comparadas ao cimento Portland ou ao clínquer Portland [SILVA, 2007].

DAL MOLIN [2005] e SILVA [2007] dividiram as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, em três grupos: i) material cimentante; ii) material pozolânico; e iii) material não reativo.

- Material cimentante: Não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes, como o C-S-H. No entanto, sua auto-hidratação normalmente é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Para acelerar a hidratação, faz-se o uso com adição ou substituição de cimento Portland. Um exemplo disto é a escória granulada de alto-forno.
- Material pozolânico: A pozolana é um material silicioso ou sílico-aluminoso, que por si só, possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas quando finamente dividido e em presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos que possuem propriedades cimentícias. Existem as pozolanas naturais, de origem vulcânica e as artificiais, como a cinza volante, a argila calcinada, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, entre outros.
- Material não reativo: É o caso do filler que, quando finamente dividido (com diâmetro próximo ao do cimento), não possui atividade química. Sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico, uma vez que possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento disperso, promovendo aumento na compacidade da mistura e, conseqüentemente, o refinamento dos poros [CORDEIRO, 2006].

Um problema que pode ser reportado na utilização das cinzas como adição mineral pozolânica é a pouca reatividade da maior parte delas, o que permite a utilização apenas como material não-reativo. As pesquisas nessa área também recaem no problema do consumo de energia fornecido ao resíduo para torná-lo reativo ou pozolânico, o que pode tornar o material inviável economicamente. A homogeneidade na produção das cinzas não pode ser exigida do processo industrial, que raramente possui controle operacional da temperatura de combustão dos resíduos e do tipo de resfriamento das cinzas. Realizados dessa forma, sem controle, esses procedimentos tendem a produzir cinzas sem reatividade hidráulica.

A temperatura na qual a casca do arroz é queimada modifica a estrutura dos seus compostos, transformando gradualmente a sílica do estado amorfo para o estado cristalino. A sílica cristalina pode ser ofensiva à saúde humana, tendo que ser mantida na forma amorfa por meio de queima controlada [MALHOTRA & MEHTA, 1996].

Chandra [1996] sugeriu que a temperatura de queima não ultrapasse 800 °C ao longo de 1 hora, para a casca do arroz, porém outros autores [SANTOS, 1997; RÊGO et al., 2004; entre outros] sugerem variações nessa temperatura, salientando que a mesma não deve ultrapassar 700 °C. Estudos realizados na Universidade da Califórnia [MEHTA, 1992] indicaram que a temperatura de queima da casca de arroz para que a sílica se mantenha na fase amorfa, situa-se entre 500 °C e 700 °C.

Estudos realizados com a cinza da casca de arroz aplicada em matrizes de cimento Portland demonstraram ganho de desempenho, em relação à sílica ativa, aos 3 dias de idade. A cinza da casca de arroz é um material potencialmente reativo, utilizada como pozolana artificial, que contém teor considerável de SiO<sub>2</sub> (acima de 90%), no qual a reatividade depende de dois fatores: a cristalinidade e a área específica [ODA e LIBÓRIO, 2002].

O estudo do comportamento de duas cinzas residuais obtidas por queimas não controladas, realizado por Prudêncio Jr et al. [2003], resultou em medidas de desempenho similares aos da sílica ativa, que é, reconhecidamente, uma pozolana de alta reatividade.

A literatura apresenta dados diversos sobre a temperatura de queima de outras cinzas. No trabalho de Lima et al. [2009], sobre a cinza da casca da castanha de caju, a temperatura de



queima nas caldeiras ficava em torno de 800 °C, o que produziu uma cinza sem reatividade pozolânica.

Di Campos [2005] estudou o emprego da cinza proveniente da queima controlada da cama de suínos, nas temperaturas de 400 °C, 500 °C, 600 °C, em matrizes de cimento Portland. A autora destaca que as cinzas de cama sobreposta de suínos, calcinadas a 600 °C (material passante na peneira no. 325) e com teor de substituição de 30%, tiveram melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão axial, com resultado de 36,0 MPa aos 28 dias, em relação às argamassas de controle (28,2 MPa), e às argamassas com 10% de sílica ativa (32,6 MPa), indicando que a cinza da cama sobreposta de suínos pode promover atividade pozolânica em matrizes cimentícias.

Quando as cinzas não possuem reatividade, podem ser aproveitadas como material de carga e/ou inerte, em substituição aos agregados em matrizes cimentícias. Na literatura, as pesquisas que estudam a substituição de agregados naturais por cinzas são recentes, sendo necessários estudos que possam contribuir, de forma científica, nessa área da engenharia.

Al-Akhras e Abu-Alfoul [2002] estudaram o efeito da cinza da palha de trigo (CPT), em substituição à areia, nas propriedades mecânicas de argamassas autoclavadas. A substituição de 10,9% de agregado fino de pedra calcária pela CPT mostrou um aumento médio dos valores de resistência à compressão, tração e flexão de 87%, 67% e 71%, respectivamente, comparados às argamassas de referência sem as cinzas.

O uso de cinzas pesadas em substituição a areia natural tem mostrado grande potencial de aproveitamento para produção de materiais à base de cimento Portland. A textura normalmente grossa, vítrea e fundida e o alto teor de sílica torna a cinza pesada a torna um substituto ideal para agregados naturais. Têm sido comumente utilizada em substituição à areia natural (de custo mais elevado) na produção de blocos de concretos e, em muitos países, usada como base na construção de rodovias [CHERIAF et al., 1999].

Além da problemática ambiental, devido ao problema de disposição final [Figura 2.18], a relevância do estudo com as cinzas pesadas deve-se a sua natureza porosa, o que intenciona o desenvolvimento de um maior número de pesquisas nesta área, uma vez que suas

características são determinadas pela composição química [CHERIAF et al., 1999; SANTOS et al., 2007; ANDRADE et al., 2007].



**Figura 2.18.** Disposição final das cinzas em bacias de decantação. Fonte: ANDRADE, 2004.

Cheriat et al. [1999] estudaram as propriedades pozolânicas da cinza pesada e atestaram que esta pode ser utilizada como adição mineral pozolânica em concretos. A moagem da cinza durante 6 horas aumentou os valores de resistência à compressão em até 27%.

Andrade et al. [2007] estudaram o uso de cinzas pesadas provenientes de termoelétricas na substituição por areia. Segundo o autor, a cinza interfere em várias propriedades: i) o consumo de água, em função de sua porosidade, teor de partículas finas, material com queima incompleta e da água naturalmente presente no interior das partículas de cinza; ii) o efeito filler; e iii) as propriedades mecânicas, devido ao efeito pozolânico e o preenchimento dos vazios.

Foram produzidos concretos com teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição de areia por cinza, em volume, em dois tipos de traços: o primeiro, usando a relação a/c constante, no valor de 0,60, denominado CRT3; o segundo, considerando a água naturalmente presente na cinza, denominado CRT4. Os resultados do ensaio de resistência à compressão apontaram para um melhor comportamento mecânico dos traços da série CRT4, com correção da quantidade de água.

Concluiu-se que os concretos do tipo 4 tiveram comportamento mecânico mais satisfatórios que os do tipo 3, também obtendo valores acima do exemplar de referência, mesmo com 100% de substituição.

### 2.3.1. As aplicações da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) vem sendo estudada tanto como adição mineral quanto como material inerte aplicado em materiais cimentícios, principalmente pelo aumento da geração desse resíduo em função da alta produção de álcool combustível e de açúcar nos últimos anos.

Hernández et al. [1998]; Singh et al. [2000], Payá et al. [2002]; Ganesan et al. [2007], Souza et al. [2007], Cordeiro et al., 2008; entre outros, usaram CBC como substituição parcial do cimento para a produção de concretos ou argamassas. Martins et al. [2007]; Macedo [2009]; Martins e Machado [2010]; Vanderlei et al. [2011]; entre outros, aplicaram a CBC em substituição ao agregado miúdo em argamassas e concretos.

No estudo de Hernández et al. [1998], foi feita uma análise comparativa entre pastas de cal utilizando 3 tipos de cinzas: a cinza da casca do arroz (CCA) – a série de controle; a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC); e a cinza da palha da cana-de-açúcar (CPC). Os autores investigaram, através de ensaios de difração de raios X, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura, as reações em pasta composta de cinza do bagaço e hidróxido de cálcio (30% de cinza e 70% de CH), com relação água-aglomerante de 0,47. Na Tabela 2.5 são apresentadas as composições químicas das cinzas utilizadas nos procedimentos experimentais.

**Tabela 2.5.** Composição química – CCA, CBC e CPC

Constituintes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	PF
CCA [%]	71,74	5,61	3,47	0,40	10,42	3,62	1,98	0,38	0,89	0,50	0,78
CBC [%]	72,74	5,26	3,92	0,84	7,99	3,47	2,78	0,32	1,59	0,13	0,77
CPC [%]	59,06	4,75	3,18	0,73	19,56	4,75	2,25	0,34	1,67	1,37	2,05

Fonte: Hernández et al., 1998 (adaptado).

Os mesmos autores ressaltaram que a alta temperatura e a combustão incompleta nas caldeiras reduziram a reatividade da cinza em função do elevado teor de carbono e da presença da sílica em estado estrutural cristalino.

Quanto à resistência à compressão, constatou-se o melhor desempenho para os corpos de prova prismáticos confeccionados com a cinza da palha da cana-de-açúcar (CPC), conforme Tabela 2.6.

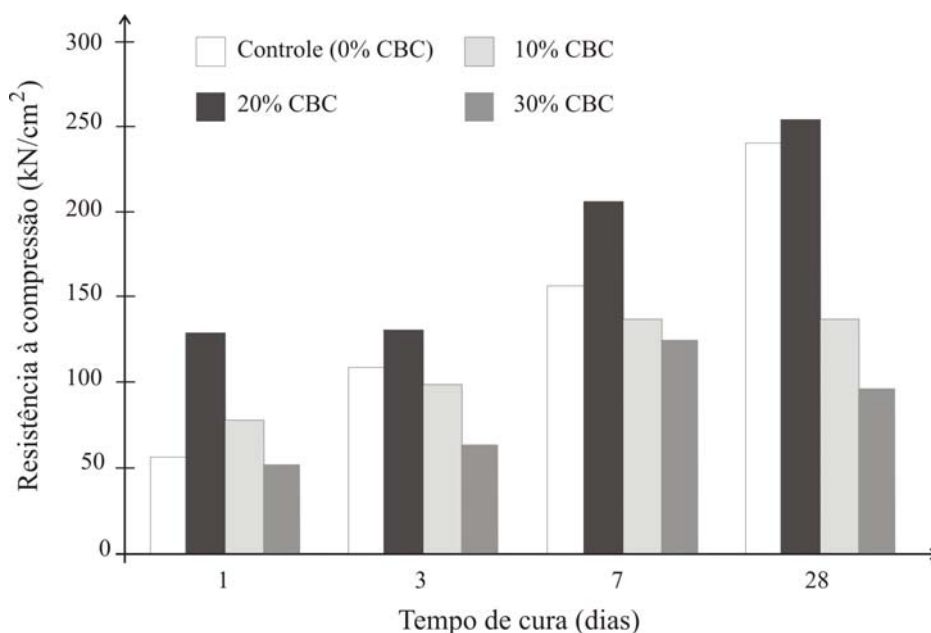
**Tabela 2.6.** Resultados do ensaio de resistência à compressão.

Amostra	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)
Cal-Pozolana CBC	7	2,7
Cal-Pozolana CBC	28	7,7
Cal-Pozolana CPC	7	7,2
Cal-Pozolana CPC	28	13,7

Fonte: Hernández et al., 1998 (adaptado).

Singh et al. [2000] analisaram a resistência à compressão, o tempo de pega e a expansão em meio de ácido sulfúrico de concretos produzidos com teores de 0%, 10%, 20% e 30% de CBC em substituição ao cimento Portland. Houve um aumento nos tempos de início e final de pega em até 8 vezes, comparando-se o concreto com 0% e 30% de CBC. Esse aumento pode ser devido, entre outras razões aos menores teores de cimento Portland nos concretos com a CBC. Os valores de resistência à compressão dos concretos com 10% de CBC foram maiores que o concreto referência, mas acima desse teor houve uma acentuada queda nos valores, como apresentado na Figura 2.19.

Payá et al. [2002] compararam o desempenho de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar coletadas da usina Ingenio Providencia, na Colômbia, com as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar queimadas em laboratório usando técnicas de termogravimetria. As cinzas coletadas da usina tiveram temperatura de queima superior a 800 °C, enquanto que as cinzas queimadas em laboratório tiveram temperatura de queima a 600 °C, por uma hora. Os resultados mostraram que a cinza queimada em laboratório fixou mais hidróxido de cálcio do que a cinza coletada da usina, isto porque a baixa temperatura de queima da cinza de laboratório disponibilizou mais sílica e alumina reativas para reagir com a cal.



**Figura 2.19.** Valores de resistência à compressão em função da idade de cura. Fonte: SINGH et al., 2000 (adaptado).

Cordeiro et al. [2005] também atestaram que a cinza produzida com a queima controlada a 600 °C, em forno resistivo, apresentou atividade pozolânica mais adequada do que as produzidas em temperaturas de 400 °C ou 900 °C, sob as mesmas condições.

Ganesan et al. [2007] estudaram os efeitos da aplicação da CBC como material substituto do cimento Portland em concretos. Foram produzidos sete traços, com 5% a 30% de CBC, em volume. O teor a/c ficou em 0,53 e os valores de abatimento (consistência) variaram em função do teor de CBC entre 64 mm (concreto com 30% de CBC) e 115 mm (concreto com 10% de CBC). Os resultados do ensaio de resistência à compressão mostraram que o concreto com até 20% de CBC obtiveram os melhores valores nas três idades analisadas, superando o concreto de referência. Adicionalmente, os concretos tiveram redução na permeabilidade à água e melhor comportamento no ensaio de penetração de cloretos.

Segundo Souza et al. [2007], na queima do bagaço da cana-de-açúcar realizada nas usinas, a temperatura da chama varia normalmente entre 850 °C e 920 °C, com 50% umidade, mas pode alcançar valores acima de 1000°C, quando a umidade estiver inferior a 35%. Tal fato pode produzir cinzas com baixa reatividade pozolânica.

Souza et al. [2007] estudaram a influência da substituição parcial do cimento CPII F 32 por CBC na produção de argamassas. A dosagem da argamassa foi realizada pelo programa computacional MECFOR utilizando o Modelo de Empacotamento Compressível [FORMAGINI, 2005<sup>4</sup> apud SOUZA et al., 2007]. Na Tabela 2.7, pode-se observar os traços utilizados na produção das argamassas.

**Tabela 2.7.** Traço das argamassas (em massa).

Componentes	Padrão (A0S)	10% de substituição (A10S)	20% de substituição (A20S)
Cimento	400	360	320
Cinza do bagaço	0	40	80
Sílica ativa	40	40	40
Areia	1380	1380	1380
Aditivo	5	5	5
Água	258	258	258

Fonte: SOUZA et al., 2007.

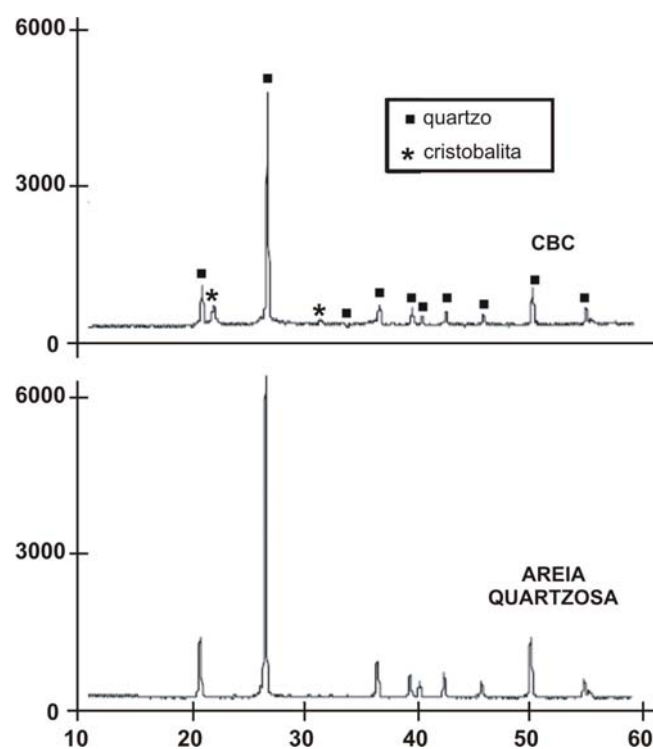
Os resultados experimentais indicaram que a substituição de 10% do cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) diminuiu em 2% a resistência à tração da argamassa. A argamassa com substituição de 20% do cimento apresentou queda de 7% na resistência em relação à argamassa de referência. Os autores concluíram que o uso da cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar, queimada em caldeira sem controle de temperatura e tempo de queima, somente com controle do tempo de moagem, possibilitou a produção de argamassas com maior resistência à compressão em comparação com a de referência até o teor de substituição estudado.

Em outro estudo, De Paula et al. [2007] também estudaram a substituição de cimento Portland por CBC em argamassas. O bagaço foi coletado e queimado em mufla por 6 horas a 600 °C. A segunda queima da CBC foi realizada por 3 horas a 700 °C, seguida de resfriamento natural. O bagaço empregado apresentou um rendimento de cinza de 10%, em massa. Os resultados encontrados para a composição granulométrica e área de superfície demonstraram que a cinza em estudo é composta por partículas com tamanhos entre 1 e 14 µm e com uma área de superfície da ordem de 24 m<sup>2</sup>/g.

<sup>4</sup> FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2005.

As argamassas com maiores teores de cinza ficaram mais porosas e apresentaram uma maior absorção de água. Os índices de atividade pozolânica acima de 75% comprovaram a reatividade da CBC analisada. Os resultados dos ensaios de compressão, aos 28 dias, indicaram a viabilidade de substituição de até 20% de cimento por CBC sem prejuízo da resistência [DE PAULA et al., 2007].

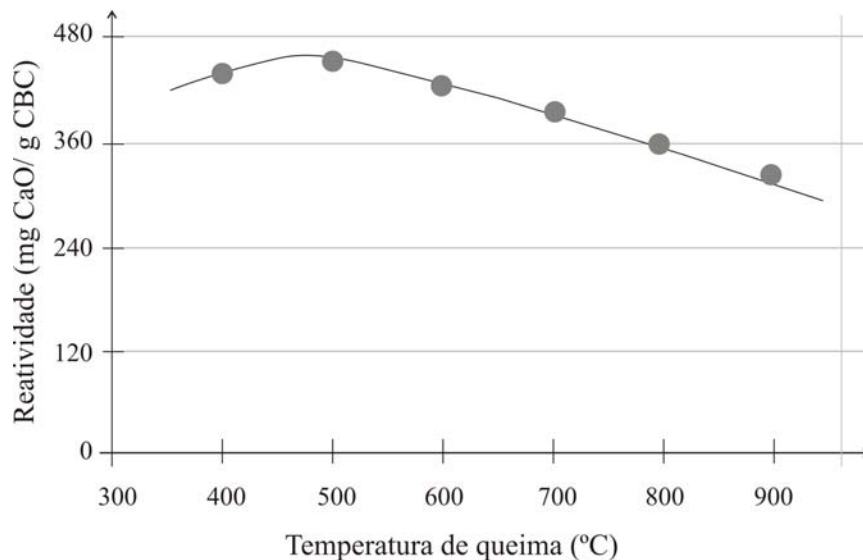
Cordeiro et al. [2008] utilizaram cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar na substituição do cimento Portland, com temperatura de queima entre 700 °C e 900 °C. Uma parte das cinzas foi moída em tempos de 8 a 240 minutos com o objetivo de se avaliar a influência do tamanho da partícula e o efeito filer na resistência a compressão das amostras, em comparação ao quartzo natural. Foram realizados ensaios de atividade pozolânica (NBR 5751 e NBR 5752) e resistência à compressão. As cinzas utilizadas eram predominantemente cristalinas, conforme o difratograma comparativo entre a cinza e a areia quartzosa, conforme Figura 2.20.



**Figura 2.20.** Difratograma da CBC e da areia. Fonte: CORDEIRO et al., 2008 (adaptado).

A atividade pozolânica, medida pelo ensaio de Chapelle, e a resistência à compressão das argamassas cresceu à medida que se aumentou o tempo de moagem da CBC, com os melhores

valores apresentados pela CBC moída por 240 minutos. Os autores enfatizaram, em suas análises, a influência da temperatura de queima na reatividade da cinza, como pode ser visualizado na Figura 2.21.



**Figura 2.21.** Efeito da temperatura de queima na reatividade da CBC utilizando o método de Chapelle modificado. Fonte: CORDEIRO et al., 2008 (adaptado).

Quanto à atividade pozolânica, as amostras produzidas com a CBC moída por 15 minutos apresentaram índice de pozolanicidade de 77%, enquanto que, com a CBC moída por 240 minutos, esse índice chegou aos 103%, superior aos 75% exigidos pela NBR 12653 e pela norma C 618 [ASTM, 2005].

Souto et al. [2009] avaliaram a influência da cinza da cana in natura em substituições parciais do cimento Portland. Os ensaios iniciais demonstraram resultados significativos em teores de substituições inferiores a 15% em comparação ao traço padrão. Com a utilização de 10% da cinza não houve comprometimento quanto à resistência à compressão axial e à consistência. Os autores observaram, também, a influência desse resíduo na consistência do concreto, uma vez que os valores do abatimento aumentou em mais de 20% para o teor de 25% de cinza, em relação ao concreto referência.

Nunes et al. [2009] também verificaram o emprego da cinza como matéria prima para produção de concretos, na substituição parcial do cimento. Utilizou-se apenas o material passante na peneira com abertura de 0,595 mm. A substituição de até 13% do cimento



produziu um ganho considerável na resistência nas primeiras idades. Isso por ser explicado devido ao preenchimento do espaço entre as partículas grossas por partículas finas.

Uma outra alternativa para a reciclagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, relacionada com a construção civil, seria a de estudar formas de aproveitamento desse subproduto como substituto parcial ou total do agregado miúdo. Na bibliografia consultada foram observadas poucas pesquisas sobre o uso da CBC como material inerte (carga) em produtos para a construção civil.

Martins et al. [2007] utilizaram a CBC como substituto para o agregado miúdo, obtendo como resultado preliminar que os corpos de prova com 100% de substituição da CBC, no lugar do agregado miúdo natural, alcançaram valores de resistência mecânica duas vezes maiores que os concretos de referência.

Macedo [2009] também substituiu o agregado miúdo pela CBC em argamassas, no traço 1:3 (em massa) com relação água/cimento de 0,48. Os teores de substituição foram de 0%, 3%, 5%, 8% e 10%, com cinco corpos de prova para cada traço. Pelos resultados do ensaio de resistência à compressão, aos 56 dias, todos os traços com CBC obtiveram resistência superior ao traço controle, o que pode ser atribuído ao efeito físico de preenchimento dos vazios pelos grãos finos da cinza e à ação do aditivo plastificante, presente nos traços com 5%, 8% e 10% de CBC. Houve um acréscimo de 23% da resistência à compressão, aos 56 dias, do traço controle em relação ao traço com 10% de CBC.

Martins e Machado [2010] também utilizaram a CBC em substituição à areia na fabricação de concretos. A relação a/c chegou a 0,60 para os maiores teores de substituição (de 40% e 50%) e obtiveram valores máximos de resistência à compressão, aos 28 dias, para teores de substituição de 20%, em massa.

Vanderlei et al. [2011] aplicaram a CBC como substituto parcial da areia em concretos. O estudo utilizou o cimento Portland CP V ARI e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar coletada no estado do Paraná. Os concretos foram dosados em três tipos de traço (rico, normal e pobre), dois tipos de abatimento ( $60 \pm 10$  mm e  $90 \pm 10$  mm) e teores de substituição entre 0% e 30%, em massa. O consumo de cimento variou entre 291,98 kg/m<sup>3</sup> e 517,70 kg/m<sup>3</sup> e os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão na idade de 3, 7 e 28 dias.

Para todos os traços, a resistência à compressão aumentou à medida que se aumentou o teor de cimento. Em relação à evolução dos valores de resistência em relação à idade de ruptura, o teor de 15% teve o melhor comportamento em relação aos demais. Aos 28 dias, na série rica, atingiu-se um ganho de 23,7% de resistência em comparação com o referencial, com um valor de 45,2 MPa.

O elevado custo da areia natural abre espaço para a entrada de outros materiais, como os resíduos, sendo esses de custo bem inferior [ZORDAN, 1997; LIMA, 1999]. Os estudos que utilizam cinzas de resíduos agroindustriais em substituição ao agregado miúdo são menos correntes do que os que pesquisam a viabilidade das cinzas em substituição ao cimento Portland, apesar da viabilidade e potencialidade indicada por vários autores [KREUZ et al., 2002; ANDRADE et al., 2007; MARTINS et al., 2007; VANDERLEI, 2011; entre outros].

No entanto, a CBC tem se mostrado um subproduto viável para aplicação em materiais de construção, desde que sejam observadas suas características intrínsecas, como alto teor de sílica em forma de quartzo, um dos principais elementos presentes na areia natural [CORDEIRO et al., 2008].

## **2.4. O encapsulamento de resíduos sólidos**

A água, em contato com os materiais, pode lixiviar compostos tóxicos, contaminando o solo e o lençol freático. Trata-se de tema de conhecimento ainda incipiente, embora venha ganhando importância e está em rápido desenvolvimento [JOHN, 2010].

Ainda assim, várias pesquisas [HEBATPURIA et al., 1999; ZHANG & BISHOP, 2002; PABLOS & SICHERI, 2007; YIN et al., 2008; entre outros] atestaram a validade do processo S/S – análise da capacidade de Estabilização/Solidificação – por meio de ligantes hidráulicos, como cimento e cal, por conterem estas altas quantidades de óxido de cálcio (CaO), um elemento essencial para se elevar o Ph da mistura e facilitar os mecanismos de precipitação dos contaminantes.

Quanto às interações com a matriz cimentícia, Chandra [1996] salientou que a presença de metais pesados pode afetar o desenvolvimento das resistências e da hidratação dos produtos cimentícios, como apresentado na Tabela 2.11.

Zhang e Bishop [2002] estudaram a estabilização/solidificação de resíduos que contenham mercúrio, usando carbono reativado e cimento Portland. Após a estabilização do mercúrio, o resíduo estabilizado foi misturado com em uma pasta de cimento Portland para realizar a solidificação. Como resultado, o estudo demonstrou que o carbono foi eficiente na estabilização desse metal pesado nas matrizes de cimento.

**Tabela 2.8.** Influência dos metais pesados na reatividade hidráulica e na qualidade do cimento e concreto. Fonte: Chandra, 1996.

Parâmetro	Influência na reatividade hidráulica	Influência na qualidade do cimento e concreto	
		Início e fim de pega	Desenvolvimento das resistências
Cádmio	não afeta	retarda	não afeta
Chumbo	↓ C <sub>2</sub> S ↑ C <sub>3</sub> A	retarda	diminui
Cloretos	↑ C <sub>3</sub> S ↑ C <sub>3</sub> A	acelera	aumenta
Cromo	↓ C <sub>2</sub> S	acelera	diminui
Manganês	↑ C <sub>3</sub> S ↑ C <sub>2</sub> S ↑ C <sub>3</sub> A ↑ C <sub>4</sub> AF	depende do teor*	diminui

(\*) Quando o manganês ocupa o lugar do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F) no C<sub>4</sub>AF em menos de 50% de substituição, a pega na matriz cimentícia é acelerada; quando esse teor passa dos 50%, ocorre o fenômeno inverso.

Pinto [2005] estudou a estabilização/solidificação em cimento de resíduos contendo metais pesados, como os efluentes gerados pela indústria curtumeira e na coleta de água de chuva de estrada. Para os ensaios com resíduo de curtume, foram preparados corpos de prova com cimento Portland e argilas brasileiras. Os resultados desse estudo mostraram que os resíduos participam da hidratação do cimento, retardando e/ou reagindo com alguns dos compostos do cimento. Os ensaios de resistência à compressão e de lixiviação mostraram que a presença das argilas colaborou no encapsulamento dos metais pesados presentes nos resíduos, pois permaneceram dentro dos valores exigidos pela legislação ambiental vigente.

Yin et al. [2008] analisaram a solidificação/estabilização de lodo de hidróxido de níquel com cimento Portland comum e cinzas de palmas oleosas. Os resultados indicaram que a dosagem ideal para a solidificação/estabilização do lodo de hidróxido de níquel, em termos de

eficiência, foi de 15% de cinzas de palmas oleosas, 35% de cimento e 50% de lodo, em massa.

Rossignolo et al. [2010] realizaram testes de solubilização e lixiviação na cinza da casca da castanha de caju (CCCC) *in natura* e, também, encapsuladas em pastas de cimento Portland. Comparando-se os resultados da solubilização das pastas com os resultados obtidos com a CCCC *in natura*, observou-se a diminuição da concentração de vários elementos e substâncias químicas. Os parâmetros para cádmio, chumbo e outros elementos ficaram abaixo do limite máximo exigido para o extrato solubilizado das pastas confeccionadas com teores variados de CCCC. A matriz cimentícia apresentou-se eficaz na diminuição ou na anulação da concentração desses elementos e substâncias, segundo ensaio de solubilização [NBR 10006/04].

Dessa forma, a análise da capacidade de Estabilização/Solidificação (técnica S/S) da CBC pela matriz cimentícia apresenta-se de grande importância quando da utilização desse resíduo nos materiais de construção.

## **2.5. Considerações a respeito da substituição de agregados miúdos pela CBC**

A escolha pela substituição da areia (agregado miúdo), e não o cimento, pela CBC, parte de duas hipóteses iniciais:

- O concreto apresenta, em sua composição, de 30 a 35% de areia, enquanto que o cimento compõe o traço entre 15-18%, em massa; nas argamassas esses mesmos números ficam em 75% e 25%, respectivamente (traços usados nesta pesquisa). Ou seja, o consumo de CBC por unidade de volume de concreto é maior quando esse resíduo substitui a areia;
- A alta temperatura de queima, a contaminação por areia e a falta de controle industrial do processo que gera a CBC, fazem com que esta cinza seja, predominantemente, não pozolânica. E destaca-se aqui o efeito químico (pozolanicidade, captura/consumo

de CH) e não o efeito físico (empacotamento), muitas vezes confundidos ou iguados como sendo o mesmo fenômeno.

Apesar de várias pesquisas recentes considerarem a substituição parcial de areia pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), tendo em vista a baixa atividade pozolânica desse tipo de cinza, em muitos casos, tais estudos não buscaram aprofundar-se nas análises das argamassas e dos concretos.

As análises de resistência à compressão se limitaram a estudar a influência da CBC com apenas um tipo de cimento, geralmente o CP V, e em baixos teores de substituição. O cimento do tipo CP V não é, nem de longe, o mais utilizado no país. E mesmo quando as análises estendem-se aos concretos, essas não chegam aos estudos de durabilidade, tão importantes para a avaliação dos produtos produzidos com a CBC, por ser esta um resíduo com alto teor de sílica e outros possíveis contaminantes.

A presente pesquisa buscou estudar a interação da CBC, como substituto parcial do agregado miúdo, com três tipos de cimento, objetivando a aplicação em artefatos para infraestrutura (CP II ou CP V). Afora isso, esta pesquisa também avançou nas questões de durabilidade, ao abordar assuntos pertinentes, como a abrasão do concreto, a carbonatação em várias idades e os estudos de envelhecimento desse material.

Considerou-se que as análises dos melhores teores de substituição e da resistência à compressão das argamassas e concretos foram importantes, e a presente pesquisa se deteve nessas análises durante algumas etapas experimentais. A partir dos resultados já alcançados, pretende-se avançar em várias questões qualitativas ainda não tratadas por pesquisas correlatas a respeito dos concretos e argamassas produzidos com a CBC.

# 3

## Desenvolvimento Experimental

---

De acordo com os objetivos especificados nos capítulos anteriores, e em acordo com a revisão da bibliografia, apresenta-se neste Capítulo o programa experimental. Para contemplar os objetivos propostos, a metodologia empregada foi dividida em oito etapas, a saber:

- 1ª. Etapa – Coleta e amostragem da CBC;
- 2ª. Etapa – Caracterização química e física dos materiais;
- 3ª. Etapa – Avaliação de argamassas produzidas com a CBC;
- 4ª. Etapa – Avaliação de concretos produzidos com a CBC;
- 5ª. Etapa – Avaliação da durabilidade dos concretos produzidos com a CBC;
- 6ª. Etapa – Execução e avaliação de artefato de infraestrutura urbana;
- 7ª. Etapa – Análise ambiental da CBC e dos concretos;
- 8ª. Etapa – Avaliação da viabilidade econômica dos concretos produzidos com a CBC.

A aplicação dessa metodologia pretendeu atender as etapas de caracterização física e química da CBC e a análise das propriedades das argamassas e dos concretos. Definidas as propriedades do material que foi empregado, assim como a tipologia do artefato urbano que foi produzido, a etapa final abrangeu a análise ambiental da CBC e a análise econômica do resíduo utilizado e do produto gerado ao final da pesquisa.

O início da pesquisa contemplou a coleta de quatro amostras de cinza em usinas do Estado de São Paulo. Depois de coletadas, as amostras foram caracterizadas e analisadas, comparativamente à areia natural usualmente empregada na cidade de São Carlos e região. Duas das quatro amostras iniciais foram descartadas, nessa primeira etapa, por apresentarem propriedades muito distintas às da areia natural. Essas amostras foram escolhidas pelos

seguintes aspectos: i) apresentaram propriedades físicas (massa específica) mais próximas às da areia natural utilizada em São Carlos; e ii) apresentaram os maiores teores de  $\text{SiO}_2$ .

Na segunda etapa, argamassas produzidas com as duas amostras de CBC foram analisadas e, após a análise dos resultados, escolheu-se uma única amostra para prosseguir nas análises da terceira etapa, a produção dos concretos. O critério utilizado foi o maior valor de resistência à compressão das argamassas produzidas com a CBC em comparação com as amostras de referência.

Para o cálculo de dosagem dos concretos, foram definidos três grupos, cada um com um tipo de cimento e uma classe de resistência específica. Dessa forma, foi possível avaliar a interação da CBC com os vários tipos de cimento comercialmente utilizados na região de São Carlos. Após a análise inicial dos concretos, foi possível definir três traços com a CBC que obtiveram os melhores resultados, e estudá-los em relação à sua durabilidade, como previu a quarta etapa de análises.

Após as análises de durabilidade, foi possível chegar ao concreto com melhores características a ser empregado na produção do artefato para infraestrutura urbana, cujo escolhido foi a guia de pavimentação. As etapas finais deste trabalho contemplaram a análise econômica e ambiental do concreto e, conseqüentemente, do artefato produzido com a CBC.

As análises experimentais contempladas em cada fase de estudos são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

**Tabela 3.1.** Resumo dos ensaios e a metodologia utilizada – 1ª. Fase

Material	Ensaio	Detalhes	Metodologia/ Equipamentos
<b>Cinza do bagaço da cana-de-açúcar</b>	Análise química	Amostra previamente solubilizada em meio de fusão alcalina	Análise quantitativa: espectrômetro de emissão ótica e espectrofotômetro de absorção atômica
	Massa específica	Média de 2 ensaios consecutivos	NM 23
	Massa unitária	Média de 3 ensaios consecutivos	NM 45
	Teor vítreo	1 análise por amostra <i>in natura</i>	Difratometria de raios X (DrX)
	Superfície específica BET	1 análise por amostra	Absorção de nitrogênio
	Microscopia Eletrônica de Varredura	1 análise por amostra	Análise da forma; Microscópio eletrônico de varredura
	Níveis de contaminação	1 amostra <i>in natura</i> para cada ensaio.	NBR 10004, NBR 10005 e NBR 10006
	Granulometria	2 ensaios consecutivos para cada amostra	NM 248
	Absorção	1 ensaio por amostra	NM 30
<b>Agregado miúdo</b>	Massa específica	Média de 2 ensaios consecutivos	NBR 9776
	Massa unitária	Média de 3 ensaios consecutivos	NM 45
	Granulometria	2 ensaios consecutivos para cada amostra	NM 248
	Absorção	1 ensaio por amostra	NM 30
<b>Agregado graúdo</b>	Massa específica	Média de 2 ensaios consecutivos	NM 53
	Massa unitária compactada	Média de 3 ensaios consecutivos	NM 45
	Massa unitária solta	Média de 3 ensaios consecutivos	NM 53
	Granulometria	2 ensaios consecutivos para cada amostra	NM 248

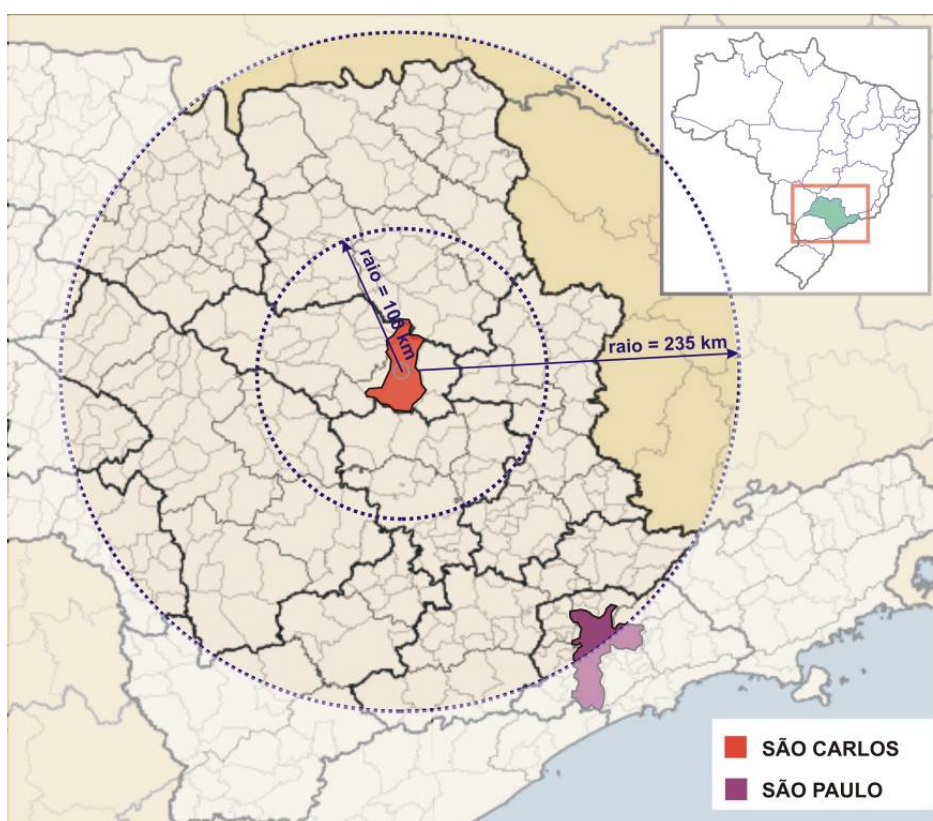


**Tabela 3.2.** Resumo dos ensaios e a metodologia utilizada – 2<sup>a</sup>., 3<sup>a</sup>. e 4<sup>a</sup>. Fases

Material	Ensaio	Detalhes	Metodologia/ Equipamentos
<b>Argamassas</b>	Resistência à compressão	Análise de 7 traços (0%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50% e 100%); idades: 7, 14 e 28 dias.	NBR 5738 e NBR 7215
	Análise da retração por secagem	Análise de 3 traços; idades: 7, e 28 dias.	NBR 12650
	Massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco	Duas análises por amostra	NBR 13278
<b>Concretos</b>	Massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco	Duas análises por amostra	NBR 9833
	Resistência à compressão axial	Análise de 3 amostras para cada tipo de cimento; teor de CBC pré-definido; idades: 7, 14 e 28 dias.	NBR 5739
	Resistência à compressão diametral	Análise de 4 amostras para cada tipo de cimento; teor de CBC pré-definido; idades: 28 dias.	NBR 7222
	Módulo de deformação tangente inicial	Análise de 3 amostras por traço; teor de CBC e tipo de cimento pré-definido.	NBR 8522
	Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	Análise de 3 amostras; teor de CBC e tipo de cimento pré-definido.	NBR 9778
	Análise da profundidade de carbonatação natural	Análise de 3 amostras; teor de CBC e tipo de cimento pré-definido; idades: 60, 120 e 210 dias.	Método colorimétrico
	Abrasão	Análise de 1 amostra por traço; teor de CBC e tipo de cimento pré-definido.	MEV
	Reatividade potencial	Análise de 3 amostras por traço; teor de CBC e tipo de cimento pré-definido.	Reatividade álcali-agregado (Método acelerado) – NBR 15577 Parte 4
	Condutividade térmica	Análise de 3 amostras por traço; teor de CBC e tipo de cimento pré-definido.	Método do fio quente paralelo
<b>Artefato</b>	Resistência à flexão	Análise de 3 amostras por traço; teor de CBC e tipo de cimento pré-definido. Idade: 28 dias.	NBR 12142

### 3.1. Coleta das cinzas e preparação das amostras

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), utilizada por esta pesquisa, foi coletada em cidades próximas ao município de São Carlos, num raio de 100 km [Figura 3.1]. As usinas nas quais foram coletadas as amostras de CBC se encontram nas seguintes cidades: Cidade “I” (22 km); Cidade “A” (40 km); Cidade “J” (110 km); e Cidade “B” (130 km). As amostras foram denominadas CBC-I, CBC-A, CBC-J e CBC-B, respectivamente.



**Figura 3.1.** Localização das usinas em um raio de 100 km da cidade de São Carlos.  
Fonte: Wikipédia – mapa do Estado de São Paulo (adaptado).

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores da capacidade instalada das usinas onde foram coletadas as amostras de CBC.

**Tabela 3.3.** Valores de produção das unidades da região centro-sul, safra 2008/2009.

Usinas	Produção de cana-de-açúcar (t)	Produção de açúcar (t)	Produção de etanol (mil litros)		
			Anidro	Hidratado	Total
Cidade B	8.004.221	445.903	183.698	228.293	411.991
Cidade J	1.946.169	171.672	9.584	57.431	67.015
Cidade I	1.717.381	164.564	9.943	45.603	55.546
Cidade A	1.414.090	161.200	0	0	0

Fonte: UNICA

Em boa parte das usinas, depois de retiradas das caldeiras, as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar ficam dispostas ao ar livre em montes à espera para serem levadas às lavouras de cana-de-açúcar, onde serão misturadas à torta de filtro e à vinhaça para serem utilizadas como adubo [Figura 3.2].



**Figura 3.2.** Cinza estocada ao ar livre na usina na cidade “A”.

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram coletadas diretamente das caldeiras, durante a etapa de limpeza destas, que ocorre diariamente. Na Figura 3.3 pode ser observada a coleta de CBC na usina (cidade “J”). A CBC foi retirada das caldeiras a altas temperaturas e foi necessário algum tempo para que a cinza esfriasse ao ar livre, lentamente.

Observou-se uma grande quantidade de areia misturada às cinzas. Essa areia é proveniente das lavouras e não deve ter sido totalmente removida durante a etapa de lavagem dos colmos de cana, no início do processo industrial. Esse fato também foi observado por Cordeiro [2006].



**Figura 3.3.** Retirada da cinza da caldeira (esquerda) e secagem da cinza ao ar livre (direita) – usina na cidade “J”

Observou-se, também, que a cinza ainda apresenta pedaços de bagaço com combustão incompleta, o que pode ser devido à queima em temperatura abaixo de 1000 °C. Para um bagaço com umidade de 50%, a temperatura de ignição fica entre 500 °C e 600 °C [COELHO, 1999].

A umidade ótima para que o bagaço tenha um bom rendimento de queima precisa ficar abaixo de 50%, segundo dados da usina da cidade “B”. Nessa usina, o método de disposição final das cinzas é diferente das demais. A cinza pesada, de fundo de grelha, é colhida automaticamente por uma esteira e se junta à cinza leve proveniente da lavagem dos gases das chaminés. Os dois tipos de cinzas se juntam em um único duto, são recolhidas por caminhões e levados para a lavoura. Na Figura 3.4, pode ser observada a coleta de amostras em um dos dutos de transporte.



**Figura 3.4.** Coleta da cinza na usina da cidade “B”.

Paralelamente à coleta de cinzas, foi aplicado um questionário aos responsáveis técnicos pelo setor industrial das usinas, de modo a obter informações sobre: dados da produção de cana-de-açúcar; produtos e subprodutos; dados sobre a queima do bagaço da cana-de-açúcar; e sobre parcerias com universidades e empresas.

As usinas pesquisadas utilizaram vários insumos químicos agrícolas nas suas lavouras, mas apenas a usina da cidade “B” forneceu o nome comercial dos produtos utilizados.

- Maturador: Athrel, Curavial e Modus;
- Inseticida: Regente;
- Nematicida: Furadan;
- Herbicida: Boral, Divron e Ametrina.

Esses dados são importantes na análise da CBC por meio do ensaio lixiviação e solubilização [NBR 10005 e NBR 10006], que avaliará os teores de contaminantes contidos na cinza. Como a CBC é utilizada como adubo, a presença de metais pesados, por exemplo, em teores acima dos recomendados, pode ser um risco de contaminação do solo agriculturável, e consequentemente, do meio ambiente.

As amostras utilizadas nas análises de caracterização e moldagem dos concretos foram obtidas a partir da CBC seca em estufa a 100 °C, por 12 h, e posteriormente moídas por 3 min, na rotação de 65 rpm [Figura 3.5]. Esse tempo de moagem foi escolhido em função do menor gasto de energia para se obter a uniformização das amostras de CBC. Na Figura 3.6 pode-se observar o aspecto da CBC *in natura* e após a moagem.



**Figura 3.5.** Moagem da CBC em moinho do tipo almofariz-pistilo



**Figura 3.6.** Aspecto visual da CBC antes (esq.) e após a moagem (dir.)

O moinho utilizado foi o do tipo almofariz/pistilo motorizado, marca Marconi, modelo MA 590, cuba em cerâmica de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 96%), pistilo em cerâmica de alumina com diâmetro de 70 mm e 50 mm de altura. Esse tipo de moinho aceita amostras com diâmetro máximo de 30 mm e com massa de até 200 g.

## **3.2. Materiais utilizados na pesquisa**

Todos os materiais utilizados nesta pesquisa cumprem as especificações da ABNT; são facilmente encontrados no mercado; e foram utilizados nas mesmas condições em que são empregados usualmente na construção civil.

### **3.2.1. Cimento Portland**

Para as análises das argamassas, utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial, CP V ARI RS (cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos). Esse cimento é comercializado pela CIMINAS S.A. (Grupo Holcim) com a denominação comercial CP V ARI RÁPIDO. As especificações foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4.** Propriedades físicas e químicas - CPV ARI RS

Propriedades	Unidade	Cimento	Elementos	Cimento
Massa específica (NM 23) <sup>1</sup>	Kg/dm <sup>3</sup>	3,01	MgO (%)	2,01
Início de pega (NBR 6474)	min	167	PF 1000°C	2,30
Finura	Retido # 200	%	Anidrido carbônico - CO <sub>2</sub>	1,24
	Sup. Esp. Blaine	cm <sup>2</sup> /g	Resíduo Insolúvel	0,50
Resistência à compressão (f <sub>cj</sub> ) (NBR 7215)	1 dia	MPa	Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub>	2,33
	3 dias	MPa		
	7 dias	MPa		
	28 dias	MPa		

Fonte: Fabricante/ <sup>1</sup> Valor obtido em laboratório (LMC/UFSCar)

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), embora contemplado pela ABNT como norma separada do cimento Portland comum, é na verdade um tipo particular deste, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade [ABCP, 2002]. O fabricante recomenda esse tipo de cimento para concretos de tubos, lajes, meios-fios, mourões, postes, elementos arquitetônicos e outros. Esse tipo de cimento atende às normas NBR 5733 e 5737 [ABNT, 1991].

Para as análises dos concretos, foram utilizados também o cimento CP III 40 RS (cimento Portland de alto forno resistente a sulfatos), que atende às normas NBR 5735 e NBR 5737, e o cimento CP II E 32, um dos tipos de cimento Portland composto de alto forno, que atende a norma NBR 11578.

O cimento de alto forno apresenta de 35 a 70% de escória de alto forno em sua composição. As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, isto é, da forma como são obtidas endurecem quando misturadas com água. Contudo, as reações de hidratação das escórias são tão lentas que limitariam sua aplicação prática se agentes ativadores, químicos e físicos, não acelerassem o processo de hidratação. A cal liberada durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando esta é adicionada ao cimento [ABCP, 2002].

O CP III 40 é comercializado, também, pelo Grupo Holcim, com a denominação comercial ULTRA FORTE – CP III 40 RS. As especificações foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5.** Propriedades físicas – CP III 40 RS

Propriedades	Unidade	Cimento	Elementos (%)	Cimento	
Massa específica (NM 23) <sup>1</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	2,98	MgO	3,18	
Início de pega (NBR 6474)	min	191	PF 1000°C	2,80	
Finura	Retido # 200	%	0,60	Anidrido carbônico - CO <sub>2</sub>	1,88
	Sup. Esp. Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4556	Resíduo Insolúvel	0,53
Resistência à compressão (f <sub>cj</sub> ) (NBR 7215)	3 dias	MPa	30,00	Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub>	2,18
	7 dias	MPa	38,00		
	28 dias	MPa	48,00		

Fonte: Fabricante/ <sup>1</sup> Valor obtido em laboratório (LMC/UFSCar)

Os cimentos Portland compostos (com as siglas E, Z e F) são os mais encontrados no mercado, respondendo por aproximadamente 75% da produção industrial brasileira; são utilizados na maioria das aplicações usuais, em substituição ao antigo CP I (cimento Portland comum) [ABCP, 2002].

O cimento CP II E 32 é vendido comercialmente em São Carlos, pelo Grupo Holcim, com a denominação comercial ULTRA FORTE – CP II E 32. As especificações foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se na Tabela 3.6.

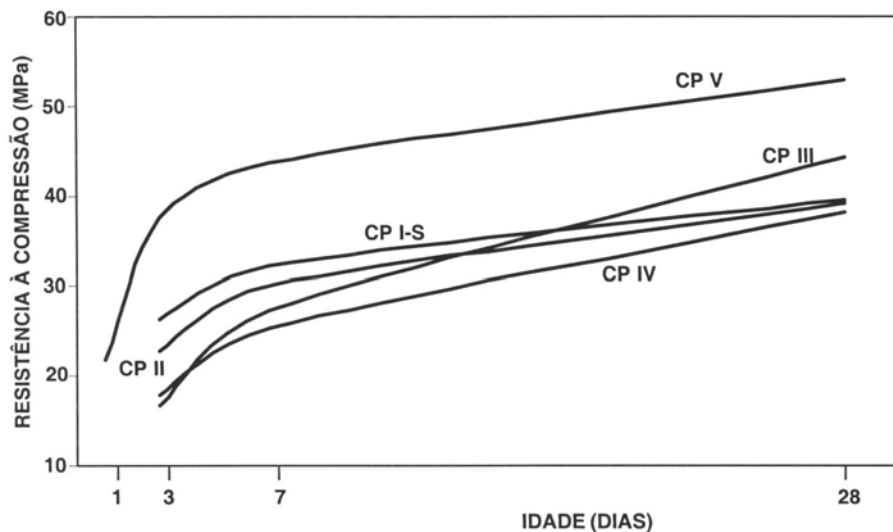
**Tabela 3.6.** Propriedades físicas – CP II E 32

Propriedades	Unidade	Cimento	Elementos (%)	Cimento	
Massa específica (NM 23) <sup>1</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	3,01	MgO	2,41	
Início de pega (NBR 6474)	min	184	PF 1000°C	4,16	
Finura	Retido # 200	%	1,60	Anidrido carbônico - CO <sub>2</sub>	3,24
	Sup. Esp. Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3996	Resíduo Insolúvel	0,57
Resistência à compressão (f <sub>cj</sub> ) (NBR 7215)	3 dias	MPa	23,00	Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub>	1,49
	7 dias	MPa	31,00		
	28 dias	MPa	40,00		

Fonte: Fabricante/ <sup>1</sup> Valor obtido em laboratório (LMC/UFSCar)

Na Figura 3.7 observa-se a evolução média da resistência à compressão dos principais tipos de cimento [ABCP, 2002].





**Figura 3.7.** Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland. Fonte: ABCP, 2002.

Dado o fato de as escórias granuladas de alto-forno e os materiais pozolânicos terem menor velocidade de hidratação em relação ao clínquer, os cimentos com adição desses materiais podem apresentar, em igualdade de condições, menor desenvolvimento inicial de resistência. Entretanto, na prática, verifica-se que as resistências efetivamente alcançadas em todas as idades superam os limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas da ABNT, que especificam os valores necessários às aplicações mais usuais.

### 3.2.2. Agregado miúdo

A areia natural quartzosa do rio Mogi-Guaçu, município de São Carlos, SP, foi utilizada como agregado miúdo na maior parte das análises desta pesquisa. A Tabela 3.7 e a Figura 3.8 apresentam a análise granulométrica da areia, segundo o método proposto pela NM 248.

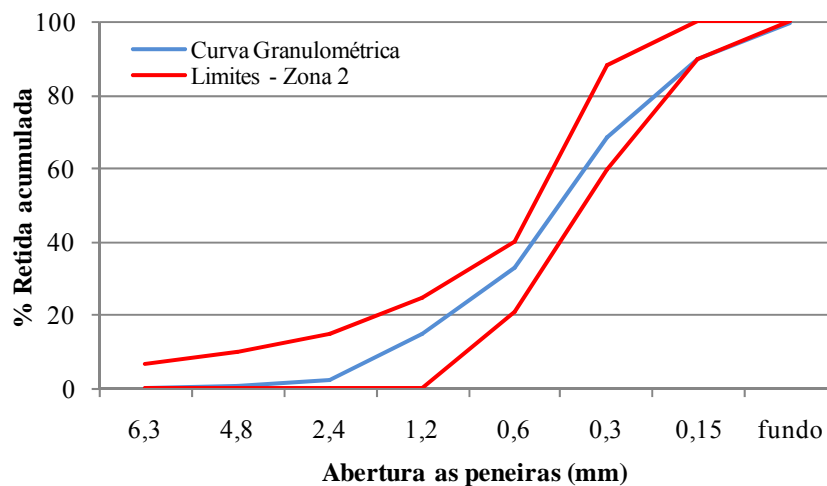
**Tabela 3.7.** Granulometria da areia natural (NM 248)

Peneiras (mm)	% Retida Acumulada		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
6,3	0,50	0,20	0,40
4,8	0,80	0,90	0,80
2,4	2,50	2,90	2,70
1,2	14,40	15,30	14,80
0,6	32,70	33,70	33,20
0,3	68,60	68,30	68,40
0,15	90,30	89,90	90,10
Fundo	99,90	100,00	99,90
DMC <sup>(1)</sup>	2,4mm	2,4mm	2,4mm
MF <sup>(2)</sup>	2,10	2,11	2,10

<sup>(1)</sup> DMC = Dimensão máxima característica ( $D_{m\acute{a}x}$ )

<sup>(2)</sup> MF = Módulo de finura

A caracterização do agregado apresentou os seguintes resultados: massa específica [NBR 9776] no valor de  $2450 \text{ kg/m}^3$ ; massa unitária no estado seco e solto [NM 45] no valor de  $2040 \text{ kg/m}^3$ ; e absorção de água [NM 30] no valor de 0,88%. A areia atendeu aos requisitos da NBR 7211 e pode ser classificada como areia fina (zona 2).



**Figura 3.8.** Curva granulométrica da areia natural (NM 248)

Na análise de retração por secagem das argamassas produzidas com CBC, foi utilizada a areia normal do IPT segundo as recomendações das normas NBR 7214 [ABNT, 1982] e NBR 12650 [ABNT, 1992].

### 3.2.3. Agregado graúdo

A brita basáltica foi utilizada como agregado graúdo nesta pesquisa. A análise granulométrica do agregado graúdo encontra-se na Tabela 3.8.

**Tabela 3.8.** Análise granulométrica do agregado graúdo

Peneiras (mm)	% Retida Acumulada			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
25,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,5	10,6	8,8	10,4	9,9
9,5	57,0	51,7	56,5	55,1
6,3	90,2	87,3	89,0	88,8
4,8	96,1	92,7	94,4	94,4
Fundo	99,9	99,9	99,4	99,8
DMC <sup>1</sup>	19mm	19mm	19mm	19mm
MF <sup>2</sup>	1,53	1,44	1,51	1,49

A caracterização do agregado apresentou os seguintes resultados: massa específica [NM 53] no valor de 2630 kg/m<sup>3</sup>; massa unitária no estado seco e solto [NM 53] no valor de 1470 kg/m<sup>3</sup>; massa unitária compactada [NM 45] no valor de 1580 kg/m<sup>3</sup>; e absorção [NM 53] no valor de 0,25%. Essa brita, no entanto, não se enquadrou em nenhum dos limites granulométricos apresentados pela NBR 7211 e não pode ser classificada por tais parâmetros, ficando entre a graduação da brita 0 e da brita 1.

### 3.2.4. Cal hidratada

Utilizou-se, para o ensaio de retração por secagem, a cal hidratada tipo CH III, marca Itaú, comercializada pela Votorantim Cimentos, com massa específica no valor de 2300 kg/m<sup>3</sup> e massa unitária no estado solto igual a 500 kg/m<sup>3</sup>. Segundo o fabricante, as especificações para os ensaios seguem as recomendações da norma NBR 7175 [ABNT, 2003].

### **3.2.5. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

As amostras de CBC foram coletadas em quatro usinas no Estado de São Paulo. As cinzas foram estocadas em caixas plásticas vedadas e armazenadas em laboratório para posterior caracterização.

## **3.3. Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

De acordo com os objetivos deste trabalho, apresentam-se os procedimentos metodológicos utilizados para a caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para sua utilização em argamassas e concretos.

### **3.3.1. Análise química – óxidos**

O método utilizado para análise química foi a de semi-quantitativa por espectrometria de fluorescência de Raios X com o equipamento Espectrômetro Philips PW 2400. Para essa análise, as amostras foram obtidas a partir de CBC seca em estufa a 100°C, por 12h, e posteriormente moída por 3 minutos, na rotação 65 RPM, em moinho tipo almofariz-pistilo da marca Marconi. O laudo da análise química foi emitido pelo Laboratório de Mineralogia, da Universidade Federal do Paraná, sob o número AQ06-000193.

### **3.3.2. Massa específica e massa unitária**

Para efeitos de dosagem, considerou-se importante conhecer o volume ocupado pelas partículas dos materiais constituintes dos concretos e argamassas.

O ensaio de massa unitária das amostras de CBC foi executado segundo os procedimentos da NM 45 [MERCOSUR, 2004]. A única alteração deu-se em relação ao recipiente, que nesta pesquisa foi alterado para 3 litros, diferentemente do que a norma exige. Essa mudança foi

necessária devido a característica da CBC, já que não se trata de um agregado, e sim, de um material pulverulento.

O ensaio de massa específica das amostras de CBC foi realizado seguindo as recomendações da norma NM 23 [MERCOSUR, 2000], utilizando como líquido o querosene e 50g de material seco *in natura*.

### **3.3.3. Análise por Difratomia de raios X**

A técnica de difratometria de Raios X possui caráter qualitativo e/ou quantitativo e tem por base a identificação das fases cristalinas presentes no material analisado. O estudo dos picos presentes no difratograma, por comparação com bancos de dados específicos, permite a avaliação sobre o quanto uma amostra é amorfa ou cristalina, como também sua análise, de forma qualitativa, em relação a outros materiais de mesma natureza.

A base teórica da análise por difração está associada ao fato de que, na grande parte dos sólidos (cristalinos), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. Desta forma, quando um feixe de raios X incide sobre um material cristalino, um outro feixe de raios difratados é produzido [CORDEIRO, 2006].

A técnica de DrX foi utilizada na análise das quatro amostras de CBC *in natura*. As análises foram realizadas no Laboratório Cristalografia de Raios X do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo. Utilizou-se um difratômetro de raios X da marca RIGAKU ROTAFLEX, modelo RU200B. As condições para realização das análises foram: i) radiação: Cu K $\alpha$ ; ii) tensão: 50Kv; iii) corrente: 100mA; iv) varredura com passo de 0,02° 2 $\theta$ ; v) tempo de coleta: 2°/min; e vi) intervalo de varredura: 3 a 100° (2 $\theta$ ).

### **3.3.4. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura**

Por possibilitar a análise semiquantitativa e quantitativa dos elementos presentes em uma amostra, a técnica de MEV foi empregada na análise das partículas da CBC.

Na microscopia eletrônica de varredura, quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, originam-se diferentes sinais, que podem ser elétrons secundários, elétrons retroespalhados, dentre outros. Essas respostas podem ser detectadas independentemente e depois de transformadas em sinais elétricos permitem a aquisição de imagens de superfície, composição de fases e análise composicional das amostras. Elétrons secundários são partículas de baixa energia resultantes de uma colisão inelástica de elétrons primários do feixe emitido com elétrons da amostra. Seu registro possibilita a caracterização da topografia da amostra, com a identificação do tamanho, a forma e a textura superficial [SARKAR et al., 2001].

As imagens foram feitas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo. Cada amostra passou por moagem durante 3 minutos, na rotação 65 RPM, em moinho tipo almofariz-pistilo da marca Marconi, apenas para homogeneização.

### **3.3.5. Análise granulométrica**

As composições granulométricas dos agregados naturais foram determinadas segundo a NM 248 [MERCOSUR, 2003]. As amostras de cinza foram secas em estufa a 100 °C, por 12h, moídas por 3 minutos na rotação de 65 RPM, em moinho tipo almofariz-pistilo da marca Marconi, apenas para homogeneização.

As amostras de cinza foram peneiradas por 10 minutos no peneirador automático de agregados miúdos, com a seguinte série de peneiras de malha quadrada: 6,3 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm. As porções retidas nas peneiras foram medidas e, a seguir, calculadas as porcentagens retidas e acumuladas.

### 3.3.6. Absorção

O ensaio para se determinar a absorção da CBC foi realizado de acordo com a NM 30 [MERCOSUR, 2001]. As amostras de cinza foram moídas por 3 minutos, na rotação de 65 RPM, em moinho tipo almofariz-pistilo da marca Marconi.

### 3.4. Estudo das propriedades das argamassas

No estudo das argamassas produzidas com a CBC em substituição ao agregado miúdo, foram selecionadas duas amostras das quatro coletadas inicialmente: CBC-A e CBC-J. Essas amostras foram escolhidas pelos seguintes aspectos: i) apresentaram propriedades físicas (massa específica) mais próximas às da areia natural utilizada em São Carlos; e ii) apresentaram os maiores teores de  $\text{SiO}_2$ .

As argamassas foram produzidas em bateadeira industrial (com três velocidades) e moldadas em corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing$  5 cm x 10 cm altura). Os materiais utilizados foram o cimento Portland CP V ARI RS, areia quartzosa, as amostras CBC-A e CBC-J e água, no traço 1:3 em massa [Figura 3.9].



**Figura 3.9.** Materiais utilizados na moldagem das argamassas para o ensaio de resistência à compressão

As amostras de cinza foram moídas por três minutos, na rotação de 65 RPM, em moinho tipo almofariz-pistilo da marca Marconi, apenas para homogeneização. Os dados da moldagem são apresentados na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9.** Dados – Moldagem das argamassas

% CBC	0%	10%	15%	20%	30%	50%	100%
Grupo Referência	BA	-	-	-	-	-	-
Grupo A (CBC-A)	-	C10A	C15A	C20A	C30A	C50A	C100A
Grupo J (CBC-J)	-	C10J	C15J	C20J	C30J	C50J	C100J

O valor da relação água/cimento foi mantido constante, no valor de 0,55. Esse valor foi obtido na literatura consultada [AL-RAWAS et al., 2005; MARZOUK et al., 2007; MARTINS et al., 2007; ISMAIL e AL-HASHMI, 2009; entre outros]. Em algumas pesquisas que estudaram a substituição do agregado miúdo por resíduos, a relação a/c foi mantida constante para todos os traços, inclusive para o de referência, e variou entre 0,45 e 0,60.

Os ensaios realizados para se determinar as propriedades das argamassas foram: i) massa específica no estado fresco e teor de vazios [NBR 13278]; ii) resistência à compressão axial; e iii) retração por secagem [NBR 12650].

A influência da variação dos teores de substituição da areia pela CBC foi analisada segundo o ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de argamassa. Por esse ensaio, foi possível avaliar o teor ótimo de aplicação da CBC pelo qual as propriedades mecânicas das matrizes cimentícias pudessem ser mantidas. Para cada amostra, CBC-A e CBC-J, foram moldados seis traços, com três exemplares cada, que foram rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em seus moldes até a idade 24 horas, quando foram desmoldados e acondicionados em câmara úmida (temperatura =  $23^{\circ} \pm 5^{\circ}$  C e umidade =  $95 \pm 5\%$ ) até a idade de ruptura.

Como a CBC pode se comportar como um material pozolânico ao ser substituído pelo cimento Portland [CORDEIRO et al., 2008], a metodologia da NBR 12650 [ABNT, 1992] foi



a escolhida para orientar o ensaio de retração por secagem. Os dados da moldagem são mostrados na Tabela 3.10.

**Tabela 3.10.** Dados – Ensaio de retração

Argamassas	Materiais			
	Areia	Cimento	CBC	a/agl
CONTROLE	2,75	1,00	-	0,448
ENSAIO-A	2,50	1,00	0,25	0,476
ENSAIO-J	2,50	1,00	0,25	0,483

Os corpos de prova prismáticos (40x40x160 mm) foram moldados em duas camadas, com 15 golpes manuais cada e, após a moldagem, foram mantidos em seus moldes e colocados em câmara úmida à temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , por  $22 \pm 2\text{h}$ . Ao final desse período, foram desmoldados e imersos em água saturada com cal, onde permaneceram até a idade de 7 dias [Figura 3.10].



**Figura 3.10.** Ensaio de retração por secagem - desmoldagem dos corpos de prova depois de 24 horas (esq.); Cura inicial em água saturada com cal (dir.)

Ao final do período de cura úmida, aos 7 dias, e imediatamente após a medição inicial, os corpos de prova permaneceram armazenados na câmara seca, à temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Decorridos 56 dias de cura em câmara seca, as leituras finais foram realizadas dentro da própria câmara a fim de se evitarem influências da umidade e da temperatura sobre os resultados. As leituras foram feitas por aparelho de medição com precisão de 1/100 mm.

O ensaio de Chappelle modificado foi utilizado na avaliação da atividade pozolânica das amostras CBC-A e CBC-J, que foram utilizadas na produção das argamassas.

O ensaio foi realizado pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. O procedimento utilizado foi o CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041 "Determinação de atividade pozolânica - Método Chapelle modificado", com base nas diretrizes gerais da publicação: “*M. Raverdy, F. Brivot, A. M. Paillere, R. Dron, **Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires** - 7e. Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris - 1980, Vol. III, IV-36/41*”.

No ensaio de Chapelle modificado, a reatividade foi determinada pela capacidade do material avaliado fixar a cal quando mantido em solução aquosa com óxido de cálcio. De forma simplificada, o método consiste em manter em ebulição, durante 16 horas, uma mistura com 1 g de CaO, 1 g da amostra e 250 g de água isenta de CO<sub>2</sub>. O resultado é expresso pela quantidade de CaO fixado por grama de amostra, e quanto maior a fixação mais reativo é o material. Um valor de consumo de CaO igual a 330 mg/g é admitido como o mínimo necessário para que o material apresente atividade pozolânica considerável.

### **3.5. Estudo da dosagem dos concretos**

A dosagem de concretos com a CBC foi feita de forma experimental e baseou-se no Método de Dosagem da ABCP, que foi adaptado do ACI (*American Concrete Institute*) e é indicado para concretos de consistência plástica a fluida. Este método fornece uma primeira aproximação da quantidade dos materiais, devendo-se realizar uma mistura experimental em laboratório para ajustar alguns parâmetros [TORRES, 1993]. Os parâmetros mais importantes deste método, a serem corrigidos, são:

- Excesso de argamassa: deve-se acrescentar brita, mantendo constante a relação a/c;
- Falta de argamassa: deve-se acrescentar areia, mantendo constante a relação a/c;
- Agregados com alta absorção de água: deve-se alterar o consumo de água inicial.

Para este estudo, foram determinados os seguintes parâmetros iniciais de dosagem:

- Relação água/cimento (em massa)  $\leq 0,60 \rightarrow$  Concreto Armado (CA) Classe de agressividade II [NBR 6118/2004 – Tabela 6.1];
- Resistência à compressão acima de 25 MPa  $\rightarrow$  Concreto exposto à classe de agressividade II [NBR 6118/2004 – Tabela 7.1];
- Abatimento do tronco de cone [NBR 7223/1992] de  $70 \pm 10$  mm – trabalhabilidade indicada para um concreto plástico, sem uso de aditivos.
- Substituição de 30% e 50%, em massa, de areia por cinza do bagaço da cana-de-açúcar, mantendo a mesma consistência dos traços de referência  $\rightarrow$  teores de CBC definidos na fase de análise das argamassas.
- Desvio padrão = 4,0 MPa  $\rightarrow$  condição A (aplicável às classes C10 até C80): o cimento e os agregados são medidos em massa e a água de amassamento é medida em massa [NBR 12655/1996].

Dessa forma, foram empregados três tipos de cimento, e para cada um destes, foi determinada uma resistência característica e sua respectiva resistência à compressão aos 28 dias, para fins de dosagem, conforme Tabela 3.11.

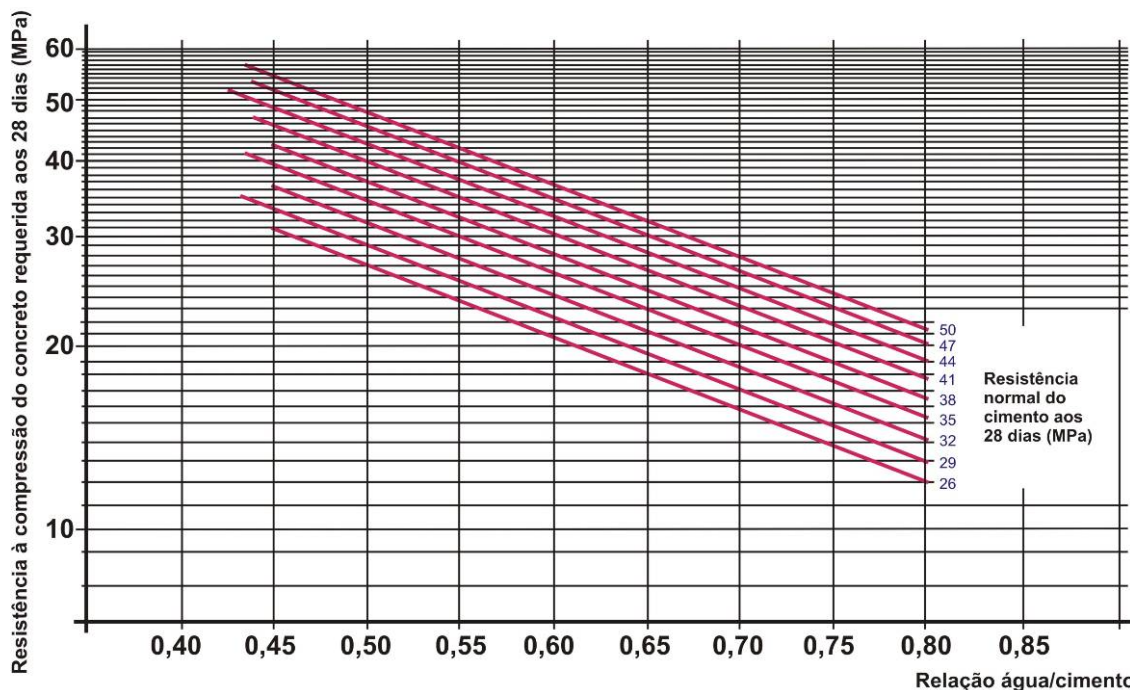
**Tabela 3.11.** Resistência característica e de dosagem dos concretos

Tipo de cimento	Resistência característica do concreto - $f_{ck}$ (MPa)	Resistência de dosagem – $f_{c28}$ (MPa)
CPV ARI RS	45,0	51,6
CPIII 40 RS	32,0	38,6
CPII E 32	25,0	31,6

Com os dados do  $f_{c28}$ , utilizou-se a Curva de Abrams para determinar a relação água/cimento inicial de cada traço referência [Figura 3.11]. Pelos cálculos de dosagem, foram determinados traços de referência (denominados AR, BR e CR) para cada tipo de cimento e cada classe de resistência.

Após os cálculos iniciais de dosagem, o parâmetro determinante para a adaptação e a uniformização dos traços em laboratório foi a consistência, mantida constante para todos os traços (abatimento =  $70 \pm 10$  mm).

As principais mudanças realizadas no traço inicial, na tentativa de se uniformizar a consistência, foram feitas no teor de argamassa e no consumo de cimento. Após os ajustes em cada traço de referência (AR, BR e CR), os traços com a adição de CBC foram calculados e também testados em laboratório.



**Figura 3.11.** Curva de Abrams. Fonte: Torres, 2003 (adaptado).

Ao final dos testes em laboratório, as dosagens finais foram obtidas, conforme os valores apresentados na Tabela 3.12.

**Tabela 3.12.** Dosagens finais dos concretos obtidos em laboratório

Tipo de cimento	Nome da série	Teor de CBC	Composição do traço de concreto (em massa)				
			Cimento	Areia	Brita	CBC	Relação a/c
CPV ARI RS	AR	0%	1,00	1,830	2,690	-	0,52
	A30	30%	1,00	1,281	2,690	0,549	0,53
	A50	50%	1,00	0,915	2,690	0,915	0,54
CPIII 40 RS	BR	0%	1,00	2,120	2,860	-	0,53
	B30	30%	1,00	1,484	2,860	0,636	0,54
	B50	50%	1,00	1,060	2,860	1,060	0,55
CPII E 32	CR	0%	1,00	2,010	2,860	-	0,52
	C30	30%	1,00	1,407	2,860	0,603	0,53
	C50	50%	1,00	1,005	2,860	1,005	0,54

O consumo de cimento foi de 425 kg/m<sup>3</sup> de cimento para todos os traços. O teor de argamassa também foi mantido constante, no valor de 51,30%. Dessa forma, mesmo com as diferenças no tipo de cimento e na classe de resistência, foi possível uma comparação posterior sobre o desempenho de cada tipo de concreto.

### 3.6. Estudo das propriedades dos concretos

Para o estudo dos concretos, foram utilizados os seguintes materiais: cimento, areia quartzosa, brita basáltica, cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC-J) e água. A amostra de CBC-J foi selecionada após a análise das argamassas por apresentar o melhor resultado nos ensaios de resistência mecânica em relação à amostra CBC-A, com destaque para os teores de substituição de 30% e 50%, de areia por cinza.

Os materiais foram misturados em betoneira de 120 dm<sup>3</sup>, à temperatura de 25 ± 3° C e umidade relativa do ar de 55 ± 15%, até a obtenção de uma mistura homogênea durante cinco minutos de mistura, aproximadamente. A colocação de materiais na betoneira obedeceu a seguinte ordem: brita (100%), areia (100%), cinza – nos traços com cinza – (100%), água (80%); mistura por 2,5 minutos; cimento (100%) e o restante da água (20%); mistura por mais 2,5 minutos [Figura 3.12].



**Figura 3.12.** Separação e mistura dos materiais na betoneira.

Nas análises das propriedades dos concretos no estado fresco, os ensaios foram realizados logo após a mistura na betoneira. Para a análise das propriedades no estado endurecido, foram

moldados corpos de prova cilíndricos em formas de PVC (Fabricante: Solotest), no tamanho de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, com adensamento do tipo mecânico e utilizando vibrador de imersão tipo agulha [Figura 3.13].



**Figura 3.13.** Moldagem e adensamento dos corpos de prova.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em seus moldes por 24 horas, e depois desse período, foram desmoldados e acondicionados em câmara úmida (temperatura  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa  $95 \pm 5\%$ ) até a idade de ensaio e/ou ruptura [ABNT, 1994a].

Os ensaios físico-mecânicos desenvolvidos com os concretos, no estado fresco e endurecido, e as respectivas normas técnicas utilizadas como parâmetros são apresentados na Tabela 3.13.

**Tabela 3.13.** Caracterização das propriedades dos concretos - Ensaio normalizados

Ensaio	Metodologia adotada
Massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco	NBR 9833
Resistência à compressão axial	NBR 5739
Módulo de deformação tangente inicial	NBR 8522
Resistência à compressão diametral	NBR 7222
Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	NBR 9778

Para o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova foram submetidos à ruptura nas idades de 7, 14 e 28 dias, de acordo com a NBR 5739 [ABNT, 1994b], em prensa servo-mecânica [Figura 3.14a].

O módulo de elasticidade foi determinado segundo a norma NBR 8522 [ABNT, 2003] e o comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com emprego de transdutores elétricos

para medição dos deslocamentos longitudinais [Figura 3.14b]. Por essa norma, considerou-se o módulo de deformação tangente inicial cordal ( $E_{ci}$ ) a 30%  $f_c$ . Para isso, dois corpos de prova com a idade de 28 dias foram submetidos à ruptura para que se pudesse estimar o valor médio do  $f_{c28}$  a ser utilizado como dado inicial do ensaio.

A resistência à tração é uma importante propriedade mecânica dos concretos e permite estimar a carga à qual ocorre fissuração em uma estrutura. A ausência de fissuração é extremamente importante para manutenção da continuidade do concreto e, em muitos casos, para prevenção de fenômenos de deterioração [NEVILLE, 1997].



**Figura 3.14.** a) Ensaio de resistência à compressão axial (esq.); b) Transdutores elétricos acoplados ao corpo de prova para medição do deslocamento longitudinal (dir.).

Para a análise de resistência à compressão diametral foram ensaiados quatro exemplares de cada traço, na idade de 28 dias, de acordo com a NBR 7222 [ABNT, 1994c]. Os corpos de prova foram posicionados na prensa servo-mecânica com o auxílio de uma base metálica e de ripas de madeira tipo *Pinus* [Figura 3.15].



**Figura 3.15.** Montagem do apoio ao corpo de prova para ensaio de tração por compressão diametral.

O ensaio de absorção total de água, prescrito na NBR 9778 [ABNT, 1987], possibilitou o cálculo do índice de vazios ( $I_v$ ), que está associado apenas ao volume total de poros acessíveis à água e não reflete a facilidade com a qual a água pode penetrar no concreto. Além do índice de vazios, o ensaio de absorção permitiu a determinação da massa específica do concreto endurecido ( $\delta$ ). Para este ensaio foram utilizados três corpos de prova, após 28 dias de cura úmida, em acordo com a norma NBR 9778 [ABNT, 1994a].

### **3.7. Estudo da durabilidade dos concretos**

Os critérios utilizados para avaliar a durabilidade de um material são baseados nos processos de deterioração. Esses processos estão associados a fenômenos físico-químicos que ocorrem entre os constituintes do concreto e os agentes agressivos, em geral presentes na água, tendo-se como exemplos o ingresso de cloretos e sulfatos, os ciclos de molhagem-secagem, a carbonatação, a reação álcali-agregado, entre outros [MACEDO et al., 2009].

Nesta etapa, foram realizadas as seguintes análises: i) profundidade de carbonatação natural; ii) condutividade térmica; iii) abrasão superficial; e iv) reatividade potencial – reação álcali-agregado. Após os resultados dos ensaios mecânicos com os concretos, foram escolhidos para os ensaios da etapa de análise da durabilidade, entre os seis traços produzidos com a CBC em substituição parcial ao agregado miúdo, os três traços que obtiveram os melhores resultados (A50, C30 e C50), assim como seus respectivos traços de referência (AR e CR).



Para a análise da profundidade de carbonatação foram moldados três corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing$  10 cm x 20 cm) para cada traço, que permaneceram em câmara úmida ( $UR = 95 \pm 5\%$ ) por 28 dias e depois em câmara seca, de temperatura e umidade controladas ( $T = 23 \pm 2$  °C/  $UR = 60 \pm 5\%$ ), até a data de ensaio. Os concretos foram ensaiados na idade de 60, 120 e 210 dias pelo método colorimétrico [RILEM, 1984].

Esse método consiste em se tratar uma superfície recém-rompida com solução de fenolftaleína diluída em álcool. O hidróxido de cálcio adquire uma tonalidade avermelhada (componente básico,  $pH > 7,0$ ), enquanto a parte que sofreu carbonatação (componente ácido,  $pH < 7,0$ ) permanece incolor.

De um modo geral, a fenolftaleína é o indicador de pH mais utilizado no meio científico devido à facilidade de uso, rapidez na realização do ensaio, custo baixo e precisão relativamente boa. Deve-se lembrar que a cor vermelha pode indicar a presença de CH, mas não a ausência total de carbonatação. A frente de carbonatação não pode ser considerada rígida, mas gradual [VILLAIN et al., 2007].

Dessa forma, esse tipo de ensaio deve ser empregado como método comparativo e qualitativo entre amostras. Essa comparação é feita pela medição, com um paquímetro, da frente de carbonatação do corpo de prova rompido diametralmente, indicada pela ausência de cor após o tratamento com a solução de fenolftaleína.

Para a análise de abrasão superficial, os concretos foram moldados em formas específicas ( $\varnothing$  30 cm x 10 cm altura), em acordo com a norma C 1138 [ASTM, 2005], no Laboratório de Materiais e Estruturas do LACTEC/UFPR [Figura 3.16]. Utilizou-se uma amostra para cada concreto, uma vez que o ensaio é analisado de forma comparativa. Os concretos ensaiados foram o AR, A50, CR, C30 e C50. Os corpos de prova permaneceram em câmara úmida ( $UR \geq 95\%$ ), por 28 dias, e depois foram submetidos ao ensaio de abrasão por três dias, com medições a cada 24 h.

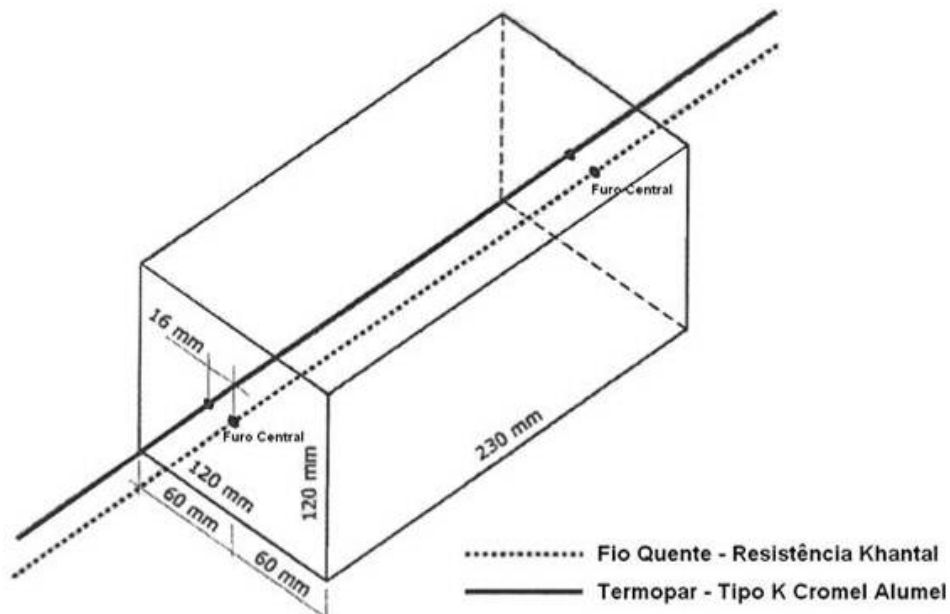


**Figura 3.16.** Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de abrasão

Para a análise da condutividade térmica dos concretos, o método escolhido foi o do Fio Quente em Paralelo. A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico, conhecidas como propriedades térmicas ou termofísicas, são as três propriedades físicas mais importantes do ponto de vista dos cálculos térmicos. Estas propriedades estão diretamente relacionadas ao potencial de isolamento térmica de um material. Existem vários métodos para a determinação do coeficiente de condutividade térmica, sendo que os mais conhecidos são: i) o método da sonda  $\lambda$ ; ii) o método das placas quentes; iii) o método do fio quente cruzado; e iv) o método do fio quente paralelo.

O método do fio quente é um método absoluto, direto e não estacionário. Sua primeira aplicação prática foi reportada em 1949, na determinação da condutividade térmica de líquidos. Todavia, foi em 1960 que se utilizou pela primeira vez essa técnica na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos. No Brasil, essa técnica foi introduzida por Santos e Cintra Filho [1986] na determinação das propriedades térmicas de cerâmicas refratárias [SANTOS, 2005].

Na técnica do Fio Quente Paralelo, dois fios são colocados no interior da amostra: o Fio Quente (Resistência Khantal) e o Termopar (tipo K Cromel Alumel), como mostrados na Figura 3.17. O fio Termopar mede a passagem de calor, em W/mK, emitido pelo Fio Quente e que atravessa a camada de material entre eles.



**Figura 3.17.** Esquemática das formas - técnica do fio quente paralelo. Fonte: SACHT, 2008.

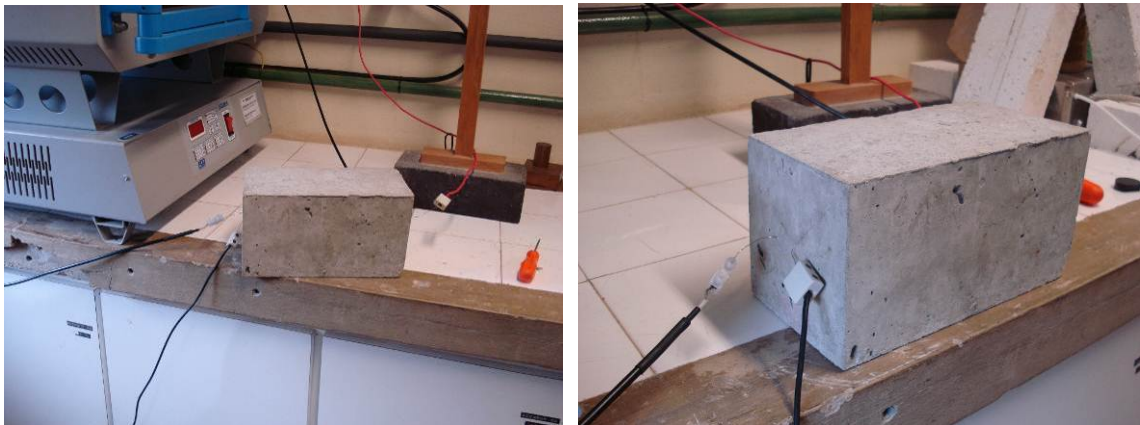
Para a moldagem dos corpos de prova (120x120x230 mm) as formas foram preparadas com desmoldante específico. O lançamento e o adensamento do concreto foram realizados de modo a não deslocar os fios, que foram previamente fixados nas formas [Figura 3.18]. Depois do adensamento, os corpos de prova foram cobertos com plástico para impedir a perda de água excessiva nas primeiras horas de hidratação do concreto. Após 24 horas de cura inicial ao ar, os corpos de prova foram desmoldados e acondicionados em câmara úmida (95% UR e  $25 \pm 2^\circ \text{C}$ ), por 28 dias.



**Figura 3.18.** Montagem dos fios paralelos nas formas de madeira.

Após esse período, os corpos de prova foram mantidos em câmara seca (60% UR e  $25 \pm 2$  °C) até a idade de 56 dias, quando foram deixados em estufa (50% UR e  $100 \pm 5$  °C) por três dias, até a data da realização do ensaio. Essa temperatura foi aplicada para que os corpos de prova secassem completamente, até a consistência de massa, de forma que a umidade não atrapalhasse a medição da condutividade.

O software desenvolvido especialmente para a determinação das propriedades térmicas pelo método do fio quente paralelo solicita os seguintes dados preliminares para a execução do ensaio: nome da amostra, nome do interessado, tipo de material (isolante ou não), tempo de ensaio (min), temperatura ambiente e da amostra (°C), tipo de termopar, resistência do fio ( $\Omega$ ), densidade da amostra ( $\text{kg/m}^3$ ) e distância fio-termopar (m). O material foi considerado, inicialmente, como pouco isolante ( $0,25 \sim 1,25$  W/mK), o tempo de ensaio em cada amostra foi de 12 minutos e a distância fio quente-termopar foi de 0,016 m, para todas as amostras. Na Figura 3.19, pode-se observar algumas etapas do ensaio realizado.



**Figura 3.19.** Ensaio dos corpos de prova pelo método do fio quente paralelo.

A reação álcali-silica é a mais conhecida reação deletéria expansiva e a que ocorre mais rapidamente [HÖEHR et al., 2010]. Para avaliar a possibilidade de reação da sílica presente na CBC com os agregados do concreto, a análise da reatividade potencial foi realizada segundo a NBR 15577 - Parte 4 [ABNT, 2008] pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, utilizando cimento-padrão. Foram analisados os agregados utilizados na produção dos concretos desta pesquisa, a areia natural do rio Mogi-Guaçu e a CBC, em traços com 0%, 30% e 50% de CBC em substituição a areia.

### **3.8. Análise da lixiviação/solubilização dos metais pesados**

Uma vez que o balanço do CO<sub>2</sub> (emissão/ absorção), durante os processos que originam a CBC são quase nulos, considerou-se analisar a capacidade de encapsulamento da cinza pela matriz cimentícia [OMETTO, 2005]. Dessa forma, análises de lixiviação e solubilização foram realizadas com a CBC *in natura* e com os concretos produzidos com e sem a CBC.

Nas análises de lixiviação e solubilização das amostras de CBC *in natura* foram determinados possíveis contaminantes e/ou metais pesados contidos no material. Tais dados apresentaram-se de grande relevância em relação aos cuidados específicos no pós-tratamento desse resíduo, uma vez que o mesmo é utilizado como adubo nas plantações de cana-de-açúcar.

Para a análise dos concretos, foram moldados corpos de prova cilíndricos em formas de PVC, no tamanho de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, com adensamento do tipo mecânico, utilizando vibrador de imersão tipo agulha. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em seus moldes por 24 horas, e depois desse período foram desmoldados e acondicionados em câmara úmida ( $95 \pm 5\%$  UR e  $23 \pm 2^\circ$  C) até a idade de ensaio.

Aos 28 dias, foram rompidos, triturados e peneirados (# abertura 9,5mm). Parte do material passante (250 gramas) foi guardado em recipiente apropriado e, posteriormente, submetido ao ensaio de solubilização [NBR 10006/04].

### **3.9. Análise da viabilidade econômica dos concretos**

Para a análise de custos dos concretos, primeiramente, foi realizado um levantamento de custos dos insumos utilizados - cimento, agregados miúdo e graúdo, água e cinza do bagaço da cana de açúcar – tendo como referência a cidade de São Carlos, SP.

Os concretos analisados foram os da série C, produzidos com o cimento CP II E 32, uma vez que esta série apresentou os resultados mais satisfatórios nas análises de durabilidade.

Para a composição de custos do cimento e dos agregados, foi considerado o valor médio de preço em treze estabelecimentos comerciais da cidade de São Carlos, SP, no mês de maio de 2011. O preço do cimento foi considerado para um saco de 50 kg e o preço dos agregados foi considerado para o volume de 1 m<sup>3</sup>. Em relação aos custos da CBC, a análise partiu da cinza *in natura* e não considerou os gastos relativos à plantação e à adubação da cana-de-açúcar.

A CBC é um resíduo que é descartado pelas usinas, ou seja, sem valor comercial quando da sua geração, após a queima do bagaço. Para a composição de custos da CBC, foi considerado o transporte, desde a usina produtora até a cidade de São Carlos (considerado um raio de 100 km) e o consumo energético com a secagem e moagem das amostras, em escala de laboratório. O tipo de veículo utilizado no transporte das cinzas foi o caminhão movido a óleo diesel. Para a composição dos custos da água usada na composição dos concretos, considerou-se o valor médio para 1 m<sup>3</sup> de água - para consumos acima de 1000 m<sup>3</sup>/ mês - em tabela fornecida pelo SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) da cidade de São Carlos, SP.

Após a análise dos custos envolvidos, foi estabelecido o valor unitário do volume de 1 m<sup>3</sup> de concreto, bem como o Índice Custo/Resistência (ICR), que também considera o desempenho mecânico obtido por cada concreto analisado.

### **3.10. Produção e análise de artefato para infraestrutura com a incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

Após a análise das amostras de CBC, bem como das argamassas e dos concretos produzidos com esse resíduo, foi possível determinar os melhores parâmetros obtidos, com a finalidade de produzir um artefato indicado para uso na infraestrutura das cidades.

A *guia de pavimentação* foi o artefato escolhido por que: i) é um item importante na drenagem adequada das vias; ii) é um componente construtivo feito de concreto não-armado, o que possibilitaria a avaliação apenas do desempenho do concreto, sem a interferência da armadura de aço; e iii) faz parte do subsistema viário.

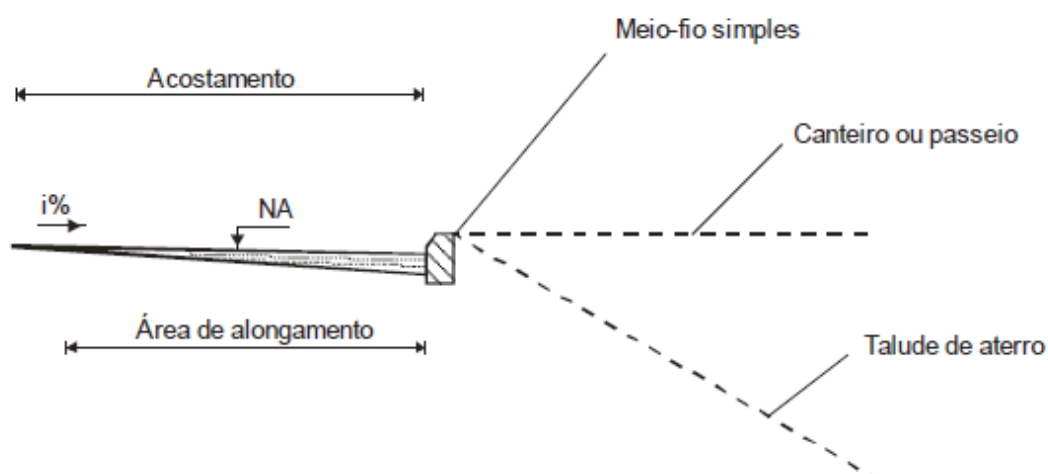
Segundo Mascaró [2005], de todos os subsistemas de infraestrutura urbana, o viário é o que exige soluções mais específicas e que merece estudos mais cuidadosos, pois:

- É o mais caro dos subsistemas, já que normalmente abrange mais de 50% do custo total de urbanização;
- Ocupa uma parcela importante do solo urbano (entre 20 e 25%);
- Uma vez implantado, é o subsistema que mais dificuldade apresenta para aumentar sua capacidade pelo solo que ocupa, pelos custos envolvidos e pelas dificuldades operativas para a sua alteração;
- É o subsistema que está mais vinculado aos usuários (os outros sistemas conduzem fluídos, e este, pessoas).

O subsistema de drenagem de águas pluviais constitui-se de duas partes: ruas pavimentadas, incluindo as guias e sarjetas; e redes de tubulações e seus sistemas de captação [MASCARÓ, 2005]. Tem como função promover o adequado escoamento da água das chuvas que caem nas áreas urbanas, assegurando o trânsito público e a proteção das edificações, bem como evitando os efeitos das inundações.

Por essas considerações, buscou-se produzir uma guia de pavimentação a ser utilizada nas vias do estado de São Paulo.

O DNIT [2006] define que a sarjeta de aterro tem como objetivo captar as águas precipitadas sobre a plataforma, de modo a impedir que provoquem erosões na borda do acostamento e/ou no talude do aterro, conduzindo-as ao local de deságue seguro, conforme ilustra a Figura 3.20.



**Figura 3.20.** Meio-fio simples e acostamento. Fonte: DNIT, 2006.

Dessa forma, sendo a guia de pavimentação um elemento estrutural em barra (uma de suas dimensões, o comprimento, predomina sobre as outras duas), estaria sujeita a esforços de flexão durante o transporte e a estocagem, antes da aplicação no leito rodoviário.

Os concretos da Série C foram escolhidos, ao final das análises mecânicas e de durabilidade, para a produção do artefato para infraestrutura, por dois motivos: i) resistência à compressão adequada; ii) custo menor em relação aos concretos produzidos com o cimento CP V ARI - Série A; e iii) melhor desempenho nas análises de durabilidade.

Para a análise da resistência à flexão dos concretos da série C, três prismas de concreto (15x15x50 cm) foram moldados, para cada tipo de concreto (CR, C30 e C50) seguindo as recomendações da NBR 12142 [ABNT, 1991]. A moldagem dos concretos nas formas foi realizada em duas camadas e o adensamento foi do tipo mecânico em mesa vibratória. Após a moldagem, os prismas permaneceram em seus moldes por 72 horas, e depois desse período, foram desmoldados e acondicionados em câmara úmida (UR  $95 \pm 5\%$  e  $23 \pm 2$  °C) até a idade de ensaio [Figura 3.21].

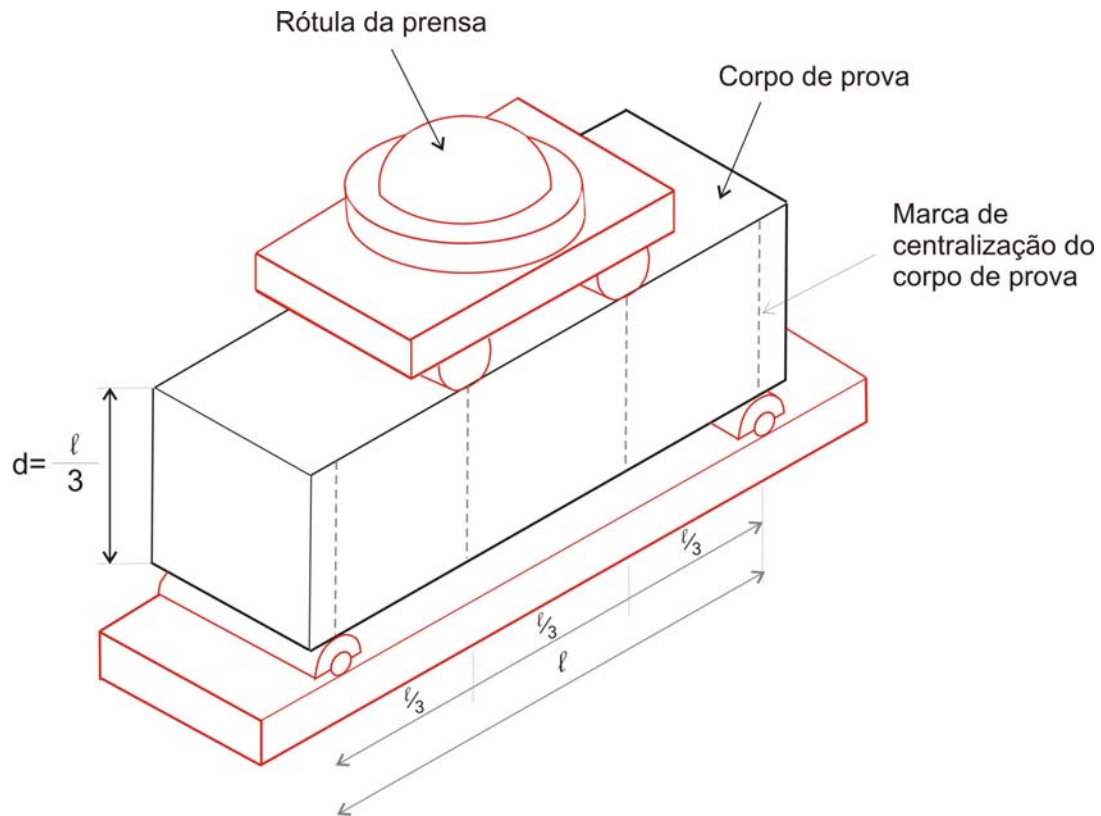


**Figura 3.21.** Desmoldagem dos prismas, após 72 horas.

Os prismas foram submetidos ao ensaio de flexão na idade de 28 dias. Para o apoio e o posicionamento do corpo de prova, foram seguidas as medidas recomendadas pela NBR 12142, de acordo com o esquema representado na Figura 3.22.

A velocidade do carregamento foi mantida em 0,3 mm/min até a ruptura dos prismas, tomando-se o devido cuidado com as rupturas ocorridas fora do terço médio do corpo de prova, que devem ser anotadas para posteriores análises do ensaio.





**Figura 3.22.** Esquema de posicionamento dos prismas na prensa de ensaio. Fonte: NBR 12142 - adaptado [1991].

Após o ensaio de flexão dos prismas, duas guias de pavimentação foram produzidas. As formas produzidas para a moldagem das guias estão apresentadas na Figura 3.23.



**Figura 3.23.** Formas produzidas para a moldagem das guias de pavimentação

Uma das guias seguiu as medidas determinadas pela Prefeitura Municipal de São Paulo <sup>1</sup>: altura 30 cm, comprimento 100 cm e espessura da base 15 cm. A segunda guia produzida foi a miniguia para jardins, cujas dimensões foram pesquisadas em empresas especializadas em peças pré-moldadas, que atuam no estado de São Paulo <sup>2</sup>. A miniguia teve as seguintes medidas: altura 19 cm, comprimento 40 cm e espessura da base 8 cm.

As guias foram moldadas seguindo as mesmas recomendações utilizadas na produção dos prismas, utilizando o concreto produzido com 30% de CBC e cimento Portland CP II E 32. As guias permaneceram nos moldes por seis dias com proteção do topo das formas com plástico filme para evitar a perda excessiva de água nas primeiras horas da hidratação do concreto. As etapas de moldagem e desmoldagem das guias podem ser observadas na Figura 3.24.



**Figura 3.24.** Etapa de moldagem e cura das guias de pavimentação

Após a desmoldagem, as guias permaneceram em câmara úmida (UR  $95 \pm 5\%$  e  $23 \pm 2$  °C) até a idade de 28 dias.

<sup>1</sup> PMSP. Disponível em: <<http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/subprefeituras/>>. Acessado em 3 mar. 2010.

<sup>2</sup> RCA Pré-moldados - Disponível em: <http://www.rcapremoldados.com.br>; e TecPavi Pré-moldados - Disponível em: <<http://www.tecpavi.com.br/guiasdeconcreto.htm>>.



# 4

## Resultados e Discussões

---

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio das análises realizadas com a CBC, as argamassas, os concretos e as guias de pavimentação produzidas.

### 4.1. Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Observou-se um alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em todas amostras, com valores acima de 75%, pela análise química da CBC [Tabela 4.1], Essa magnitude de valor também foi observada por CORDEIRO et al. [2008].

**Tabela 4.1.** Resultado da análise química com os principais elementos identificados nas amostras de CBC

Elementos (%)	CBC-A	CBC-B	CBC-I	CBC-J
$\text{SiO}_2$	93,5	62,7	96,2	88,2
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	3,8	13,3	1,9	7,4
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	0,8	1,9	0,3	1,4
$\text{TiO}_2$	0,5	3,1	0,2	1,0
$\text{CaO}$	0,4	0,9	0,1	0,6
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,2	0,7	0,1	0,4
$\text{MgO}$	0,3	0,6	< 0,1	0,4
$\text{SO}_3$	< 0,1	0,2	0,1	< 0,1
Perda ao fogo	0,34	16,28	1,04	0,35

Notou-se que a amostra CBC-B se diferenciou das demais, principalmente em relação ao teor de sílica e de perda ao fogo. Essa característica pode ser explicada pelo sistema de coleta que mistura a cinza pesada, das caldeiras, com a cinza leve das chaminés, bastante escura. De acordo com Cordeiro [2006], a coloração escura das cinzas indica um alto teor de carbono, é uma característica de combustão incompleta do bagaço.

O silício é absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossílico ( $H_4SiO_4$ ) e, após a saída da água das plantas por transpiração, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel. O acúmulo de silício entre a cutícula e a parede das células da epiderme funciona como uma barreira física à penetração de fungos patogênicos e reduz as perdas de água por transpiração [BARBOZA FILHO e PRABHU, 2002].

Outra possível fonte de sílica para a cinza é a areia (quartzo), oriunda da lavoura, que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem no processamento da cana-de-açúcar. Esta areia permanece no bagaço e pode ser observada nas operações de limpeza dos salões das caldeiras, onde ocorre a combustão [CORDEIRO, 2006; CORDEIRO et al., 2008].

Pelos resultados das análises granulométricas das amostras de CBC, a CBC foi classificada como areia fina, com módulos de finura entre 0,6 e 1,2 [Tabelas 4.2 a 4.5]. Esses valores são compatíveis aos da areia comumente utilizada na cidade de São Carlos, proveniente do Rio Mogi-Guaçu.

**Tabela 4.2.** Análise granulométrica da amostra CBC-A

Amostra 1			Amostra 2		
Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
6.3	0,00	0,00	6.3	0,00	0,00
4.8	0,04	0,04	4.8	0,09	0,09
2.4	0,10	0,14	2.4	0,15	0,24
1.2	0,17	0,31	1.2	0,26	0,50
0.6	4,80	5,11	0.6	5,28	5,78
0.3	53,70	58,81	0.3	52,04	57,82
0.15	23,70	82,51	0.15	23,97	81,79
Fundo	17,46	99,97	Fundo	18,20	99,99
Soma	99,97		Soma	99,99	
Módulo de finura		1,47	Módulo de finura		1,46
DMC		1,20	DMC		1,20

**Tabela 4.3.** Análise granulométrica da amostra CBC-B

<b>Amostra 1</b>			<b>Amostra 2</b>		
Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
6.3	0,00	0,00	6.3	0,00	0,00
4.8	0,00	0,00	4.8	0,00	0,00
2.4	0,00	0,00	2.4	0,00	0,00
1.2	0,05	0,05	1.2	0,08	0,08
0.6	0,08	0,13	0.6	0,12	0,20
0.3	5,40	5,53	0.3	5,06	5,26
0.15	43,53	49,06	0.15	38,94	44,20
fundo	50,94	100,00	fundo	55,80	100,00
Soma	100		Soma	100	
Módulo de finura		0,55	Módulo de finura		0,50
DMC		0,60	DMC		0,60

**Tabela 4.4.** Análise granulométrica da amostra CBC-I

<b>Amostra 1</b>			<b>Amostra 2</b>		
Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
6.3	0,00	0,00	6.3	0,00	0,00
4.8	0,00	0,00	4.8	0,00	0,00
2.4	0,00	0,00	2.4	0,00	0,00
1.2	0,00	0,00	1.2	0,02	0,02
0.6	0,10	0,10	0.6	0,88	0,90
0.3	54,70	54,80	0.3	58,52	59,42
0.15	33,08	87,88	0.15	30,12	89,54
Fundo	12,10	99,98	Fundo	10,45	99,99
Soma	99,98		Soma	99,99	
Módulo de finura		1,43	Módulo de finura		1,50
DMC		0,60	DMC		0,60

**Tabela 4.5.** Análise granulométrica da amostra CBC-J

Amostra 1			Amostra 2		
Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
6.3	0,00	0,00	6.3	0,00	0,00
4.8	0,10	0,10	4.8	0,10	0,10
2.4	0,60	0,70	2.4	0,60	0,70
1.2	0,58	1,28	1.2	0,60	1,30
0.6	2,20	3,48	0.6	2,20	3,50
0.3	40,05	43,53	0.3	40,00	43,50
0.15	30,00	73,53	0.15	30,00	73,50
fundo	26,47	100,00	fundo	26,50	100,00
Soma	100,00		Soma	100	
Módulo de finura		1,23	Módulo de finura		1,23
DMC		0,60	DMC		0,60

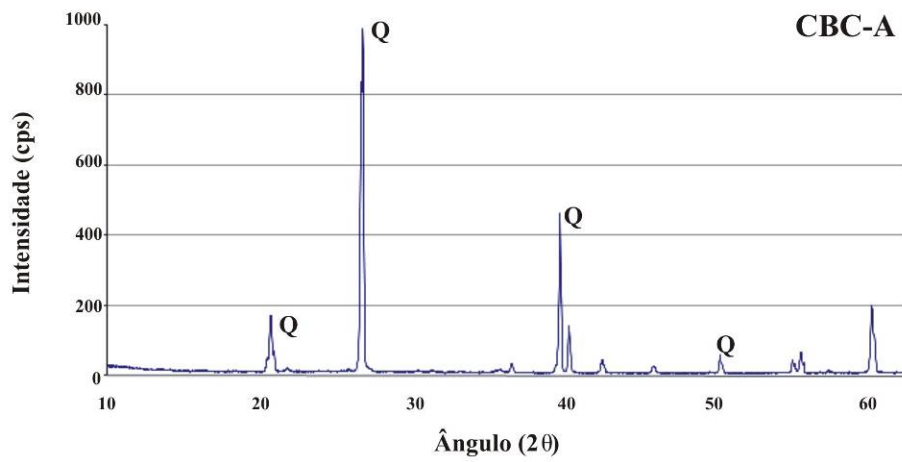
O resultado das massas específicas e unitárias das amostras de CBC se aproximaram muito dos valores referentes ao agregado miúdo, um importante parâmetro para a definição dos traços de argamassa e concretos na próxima fase de análises. As cinzas provenientes da queima de resíduo sólido municipal (RSMI), estudadas por Al-Rawas et al. [2005], apresentaram valor de massa específica de  $2,73 \text{ kg/dm}^3$ , bastante próximo das amostras CBC-J e CBC-A [Tabela 4.6].

**Tabela 4.6.** Resumo das propriedades físicas das amostras de CBC

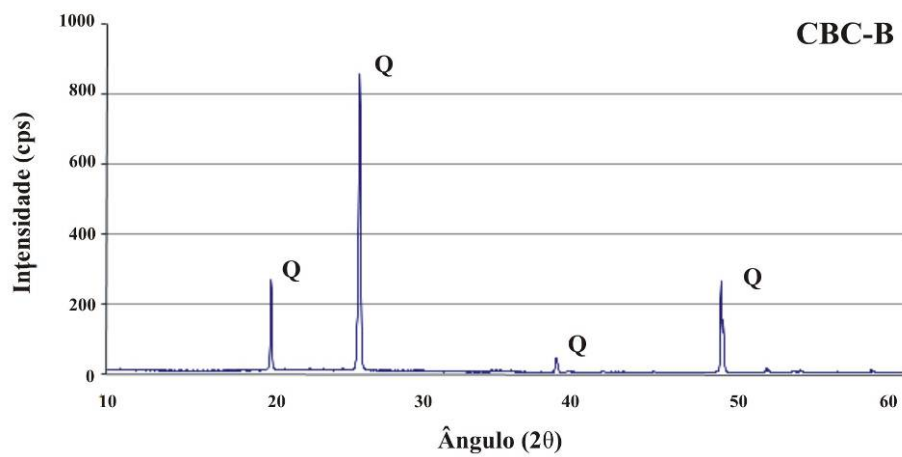
Propriedades	CBC-J	CBC-I	CBC-B	CBC-A
Módulo de Finura	1,23	1,46	0,52	1,46
Dimensão Máxima Característica (mm)	0,60	0,60	0,60	1,20
Massa Unitária ( $\text{kg/dm}^3$ )	1,39	1,30	0,98	1,43
Massa Específica ( $\text{kg/dm}^3$ )	2,65	2,58	2,23	2,63

No trabalho de Souto et al. [2009], o valor encontrado para a dimensão máxima característica (DMC) da CBC ficou em 0,60 mm, o mesmo encontrado para as amostras CBC-B, CBC-I e CBC-J.

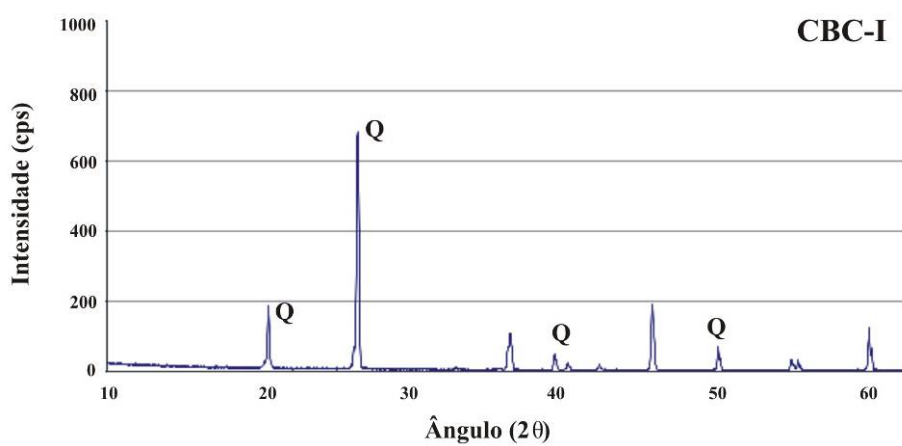
Pela difratometria de Raios X, pode-se constatar o estado estrutural cristalino de todas as amostras analisadas, principalmente pela ausência de um halo amorfo nos difratogramas [Figuras 4.1 a 4.4].



**Figura 4.1.** Difratoograma da amostra CBC-A (Q = quartzo).

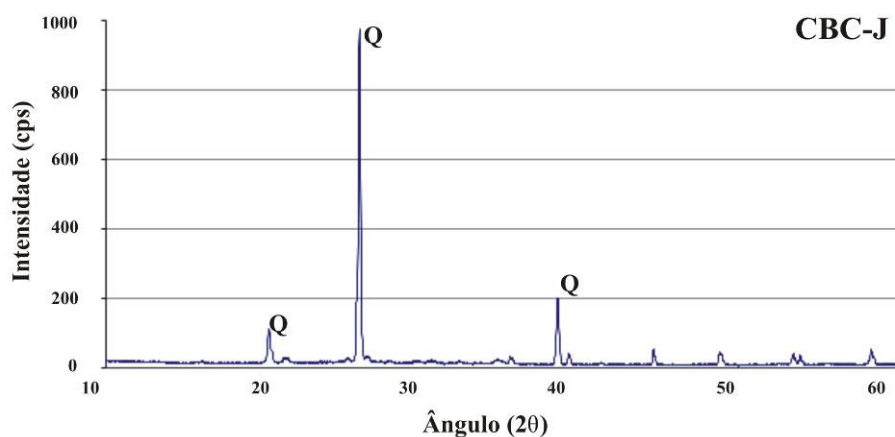


**Figura 4.2.** Difratoograma da amostra CBC-B (Q = quartzo).



**Figura 4.3.** Difratoograma da amostra CBC-I (Q = quartzo).



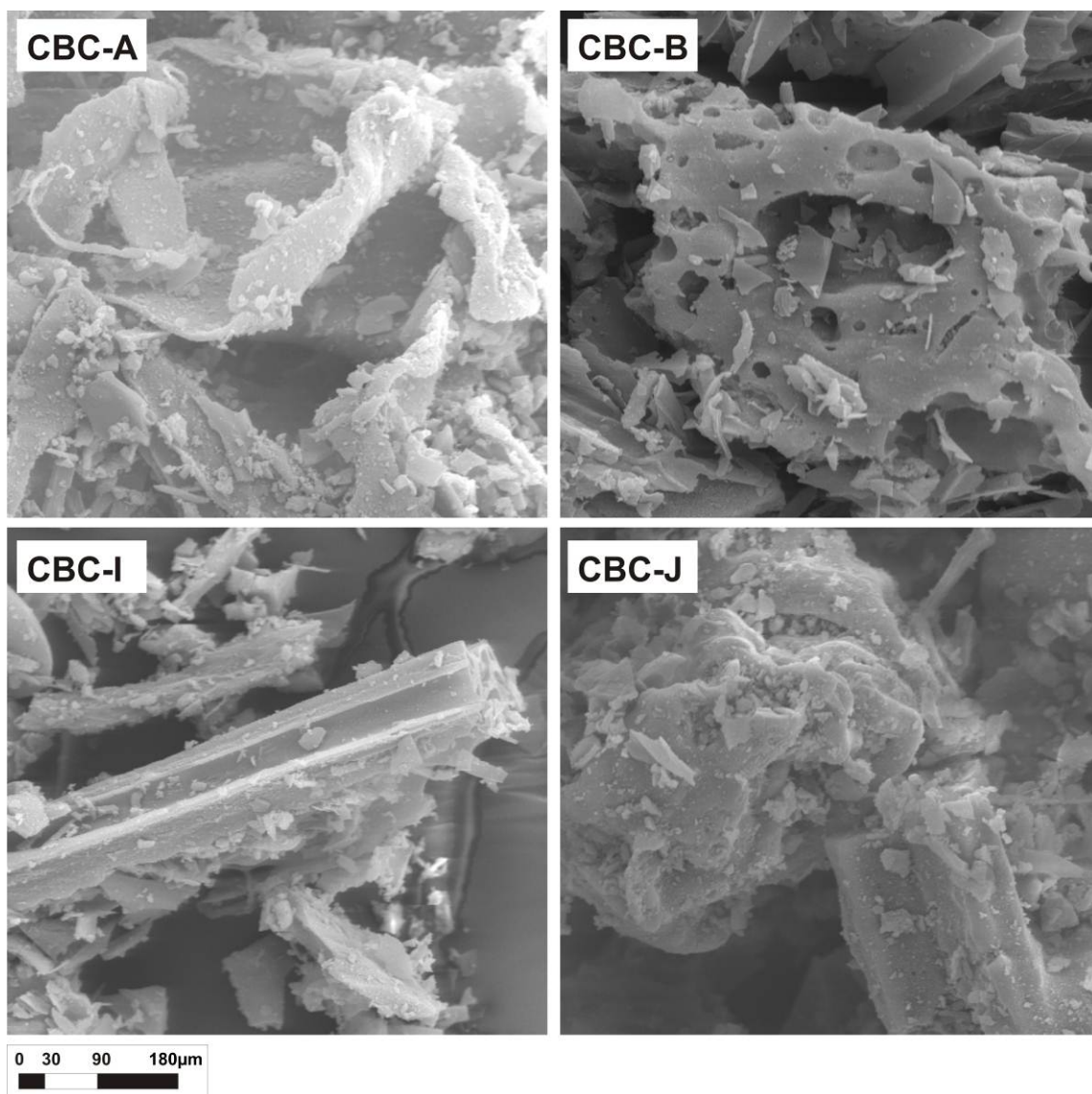


**Figura 4.4.** Difratoograma da amostra CBC-J (Q = quartzo).

Apesar de existirem outros elementos na CBC, o quartzo prevaleceu como o principal constituinte da cinza, o mesmo observado por Cordeiro et al. [2008]. Tal fato reforça a hipótese de substituição da CBC pelo agregado miúdo, que é um material inerte, e não pelo cimento Portland, que tem propriedades aglomerantes.

Utilizou-se a análise por MEV para obter micro-imagens das partículas de CBC [Figura 4.5]. Observou-se que as partículas de CBC são formadas por grãos de tamanhos e formatos variados, de até 150  $\mu\text{m}$ , e possuem aspecto lamelar com camadas sobrepostas e com pequenas partículas aderidas à superfície. As amostras também apresentaram aspecto microporoso, além de fragmentos de bagaço não-queimados, principalmente na amostra CBC-B, que também é a amostra que possui maior teor de perda ao fogo [Tabela 5.1].

Cordeiro [2006] também notou que a morfologia das partículas da cinza produzida a 600  $^{\circ}\text{C}$  é caracterizada por elementos fibrilares e microporosos, com tamanhos variados e que possuem fosfato e sílica como elementos principais.



**Figura 4.5.** Micrografias das amostras de CBC com ampliação de 1000x.

Os resultados referentes ao ensaio de absorção, segundo a NM 30 [MERCOSUR, 2001] encontram-se na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7.** Resultados do ensaio de absorção

Propriedades	CBC-A	CBC-B	CBC-I	CBC-J
Massa saturada (g)	998,90	1005,9	1010,40	1007,40
Massa seca (g)	983,80	986,00	994,80	997,30
Absorção (%)	1,53	2,02	1,57	1,01

A amostra CBC-B apresentou o dobro da absorção da amostra CBC-J, que foi a amostra com valores de absorção que mais se aproximaram do valor da absorção da areia (Capítulo 3).

Após a análise das amostras coletadas, pode-se afirmar que uma amostra de CBC passível de ser utilizada como substituto da areia (agregado miúdo) em concretos e argamassas necessita estar enquadrada nos valores especificados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8.** Propriedades físicas e químicas da CBC utilizada como substituta parcial da areia

Propriedades	Valores mínimos	Valores máximos
Módulo de Finura	1,30	2,10
Dimensão Máxima Característica (mm)	0,60	2,40
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	1,30	2,10
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,40	2,70
Absorção (%)	-	1,00

Esses valores se aplicam à substituição da CBC pela areia média, como nesta pesquisa. Para outros tipos de agregado miúdo usados em aplicações específicas (ex.: areia fina para reboco ou areia grossa para emboço) a faixa de valores contidos nessa tabela podem ser alterados para mais ou para menos.

Por esses parâmetros, as amostras CBC-J e CBC-A foram escolhidas para a etapa de análises com argamassas e concretos pelos menores valores de absorção e pelos maiores valores de massa específica, entre as quatro amostras analisadas inicialmente.

## 4.2. Análise das propriedades das argamassas

Os resultados do ensaio de massa específica no estado fresco das argamassas encontram-se nas Tabelas 4.9 e 4.10. Os valores variaram entre 2120 kg/m<sup>3</sup> (Referência) e 2250 kg/m<sup>3</sup> (C50J) com os maiores valores referentes às argamassas produzidas com a CBC.

**Tabela 4.9.** Resultados do ensaio de massa específica no estado fresco (CBC-A)

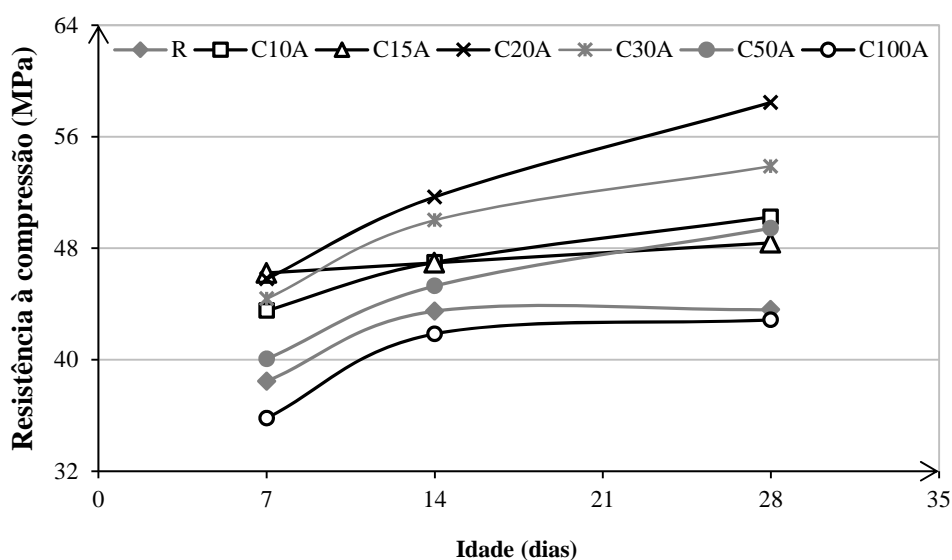
Série	REF	C10A	C15A	C20A	C30A	C50A	C100A
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2120	2140	2140	2220	2190	2190	2210
Ar incorporado (%)	6,21	5,07	5,26	2,48	2,87	2,76	2,65

**Tabela 4.10.** Resultados do ensaio de massa específica no estado fresco (CBC-J)

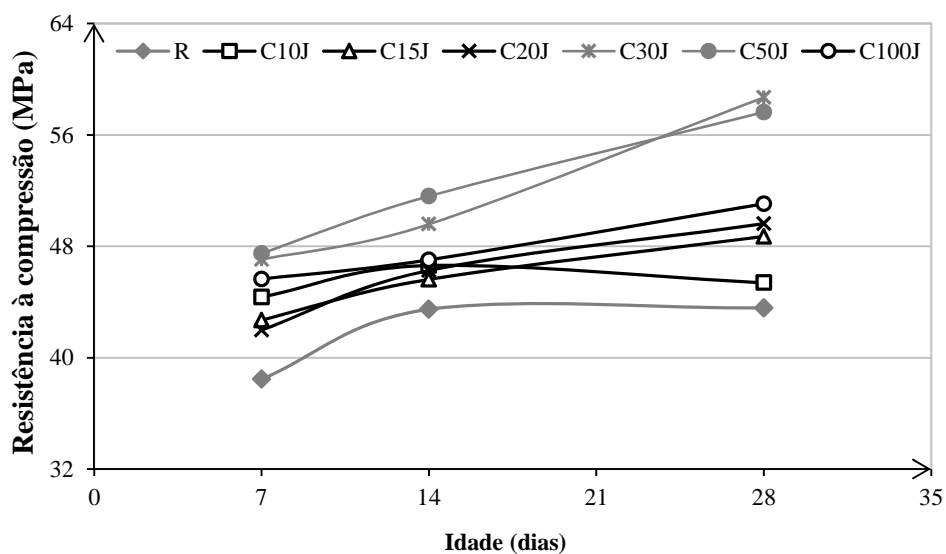
Série	REF	C10J	C15J	C20J	C30J	C50J	C100J
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2120	2140	2170	2170	2170	2250	2260
Ar incorporado (%)	6,21	5,77	4,71	4,52	4,60	1,02	1,01

Esse maior valor de massa específica pode ser devido ao efeito de empacotamento (efeito físico) da CBC na argamassa. As adições minerais podem interferir nas propriedades das matrizes cimentícias em decorrência das reações entre os silicatos amorfos e o hidróxido de cálcio, bem como da ação de empacotamento (efeito fíler), de nucleação e de diluição do cimento Portland pelas partículas finas da adição [CORDEIRO, 2006].

Os valores de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7. Quase todas as amostras produzidas com a CBC obtiveram valores maiores que o exemplar de referência, com exceção do C100A.



**Figura 4.6.** Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas (amostra CBC-A)



**Figura 4.7.** Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas (amostra CBC-J)

As amostras produzidas com 20% de CBC-A e com 30% de CBC-J alcançaram resultados 28% e 34% acima do exemplar de referência, respectivamente, na idade de 28 dias. A utilização do teor de 50% da amostra CBC-J também apresentou resultado satisfatório, com valor 32% acima do exemplar de referência.

Todos os corpos de prova romperam em formato cônico [Figura 4.8], em acordo com a NBR 5739 [ABNT, 1994], o que representa a homogeneidade das misturas e o correto adensamento e cura dos corpos de prova.



**Figura 4.8.** Ruptura dos corpos de prova de argamassa – modelo cônico

O fato das argamassas com CBC terem obtido valores acima dos valores de referência pode ser devido ao efeito físico de empacotamento das partículas [CORDEIRO et al., 2008], uma vez que os valores de massa específica as amostras CBC-J e CBC-A são menores que as da areia. Esse aumento nos valores de resistência não deve ser creditado à pozolanicidade da CBC (efeito químico) uma vez que as amostras CBC-J e CBC-A apresentaram baixo índice de reatividade com o CaO no ensaio de Chapelle modificado.

A trabalhabilidade das argamassas permaneceu constante para todas as amostras, com exceção das argamassas com 100% de substituição de areia por cinza (C100A e C100J). Essa perda de trabalhabilidade pode ter ocorrido devido a menor granulometria da CBC em relação à areia, o que requer mais água de amassamento para manter a mesma consistência no estado fresco. A amostra produzida com 100% de substituição de areia por CBC-A também apresentou resultados no ensaio de resistência à compressão maiores que o da amostra de referência, mas a utilização desse teor em concretos pode tornar-se restrito devido a pouca trabalhabilidade da mistura. Nesse caso, seria necessário o uso de um aditivo superplastificante nas argamassas.

Todas as amostras de cinzas coletadas nas usinas paulistas apresentaram estado estrutural cristalino, observado pelos difratogramas de raio X. Os resultados do ensaio de Chapelle modificado e os difratogramas reforçam o efeito físico de empacotamento, proporcionado pela CBC e descartam a sua reatividade pozolânica.

Martins et al. [2007] também utilizaram a CBC como substituto para o agregado miúdo (areia fina com DMC = 1,2 mm). Os autores utilizaram o cimento CP II Z 32, a cura foi realizada em tanques de água saturada com cal e a relação a/c utilizada foi de 0,64 para todos os corpos de prova. Como resultado preliminar, os corpos de prova com 100% de substituição da CBC, no lugar do agregado miúdo natural, alcançaram valores de resistência à compressão duas vezes maiores que os exemplares de referência, aos 28 dias.

A NBR 12650 [ABNT, 1992] estabelece a determinação da retração por secagem devido à utilização de materiais pozolânicos por meio da análise de corpos de prova com a substituição do agregado miúdo por material pozolânico ou adição mineral.

Neville [1997] afirmou que a maior influência na retração deve ser creditada ao agregado, uma vez que a adição deste restringe a retração que deveria efetivamente ocorrer. Os valores obtidos pelas leituras aos 7 e aos 56 dias, baseados na norma NBR 12650 [ABNT, 1992], são apresentados na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11.** Resultados - Ensaio NBR 12650/92

R <sub>S</sub> A (%)	R <sub>S</sub> J (%)	R <sub>S</sub> C (%)	VR <sub>S</sub> A (%)	VR <sub>S</sub> J (%)
0,0134	0,0151	0,0121	0,0013	0,0030

R<sub>S</sub> A - retração média por secagem das barras da mistura “Ensaio A” (%)

R<sub>S</sub> J - retração média por secagem das barras da mistura “Ensaio J” (%)

R<sub>S</sub> C - retração média por secagem das barras da mistura “Controle”

VR<sub>S</sub> A - variação da retração por secagem entre as barras da mistura “Ensaio A” e “Controle” (%)

VR<sub>S</sub> J - variação da retração por secagem entre as barras da mistura “Ensaio J” e “Controle” (%)

Nesta pesquisa, a leitura final foi feita aos 56 dias, pois a reação pozolânica ocorre lentamente e não pode ser completamente verificada aos 28 dias. Cyr et al. [2006] comprovaram que os efeitos físicos e químicos da reação pozolânica podem ocorrer até a idade de 180 dias. Notou-se que os valores de retração por secagem ficaram abaixo do que é estipulado pela NBR 12653 [ABNT, 1992], 0,05% de variação entre as barras “Controle” e “Ensaio”. No trabalho de Macedo [2009], o aumento que ocorreu na retração por secagem das argamassas devido o emprego da CBC também ficou abaixo do estipulado pela norma, no valor de 0,026%.

Pode-se concluir que a adição de CBC não contribuiu para o aumento da retração por secagem das argamassas, o que pode evitar o aparecimento de fissuras e a perda de durabilidade ao longo do tempo.

Com o ensaio de Chapelle modificado, pretendeu-se aferir a reatividade química das amostras de CBC. Os resultados do consumo de CaO por grama de cinza apontaram que CBC-A consumiu 45mg CaO e a CBC-J consumiu 48mg CaO durante o tempo de ensaio. Esses valores ficaram bem abaixo de 330mg CaO, que é o valor mínimo para que uma adição mineral seja considerada pozolânica. Sendo assim, pode-se afirmar que as amostras de CBC analisadas não possuem reatividade pozolânica.

Sendo assim, ao final desta etapa de análises, os teores de 30% e 50% de substituição de areia por CBC foram escolhidos por terem apresentado o melhor desempenho nas análises com as

argamassas. Da mesma forma, optou-se pela amostra CBC-J para a continuação das análises das propriedades dos concretos, por esta ter apresentado o desempenho mais adequado nas argamassas, como substituta parcial da areia natural.

### 4.3. Análise das propriedades dos concretos

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado segundo as recomendações da NBR 7223 [ABNT, 1992] e repetido até a obtenção da consistência desejada para todos os concretos [Figura 4.9].



**Figura 4.9.** Etapas, em laboratório, dos testes realizados para os ajustes nos traços de concreto

O teor de argamassa também foi mantido constante como forma de homogeneizar a dosagem do concretos [Tabela 4.12]. Os valores de abatimento ( $70 \pm 10$  mm) são referentes a um concreto plástico [TORRES, 1993] e foram assim escolhidos porque nesta fase de análises não se utilizou aditivo superplastificante nas misturas. O uso do aditivo poderia modificar/aumentar as interações entre a CBC e a matriz cimentícia, o que não permitiria a análise isolada do comportamento da CBC nos concretos.

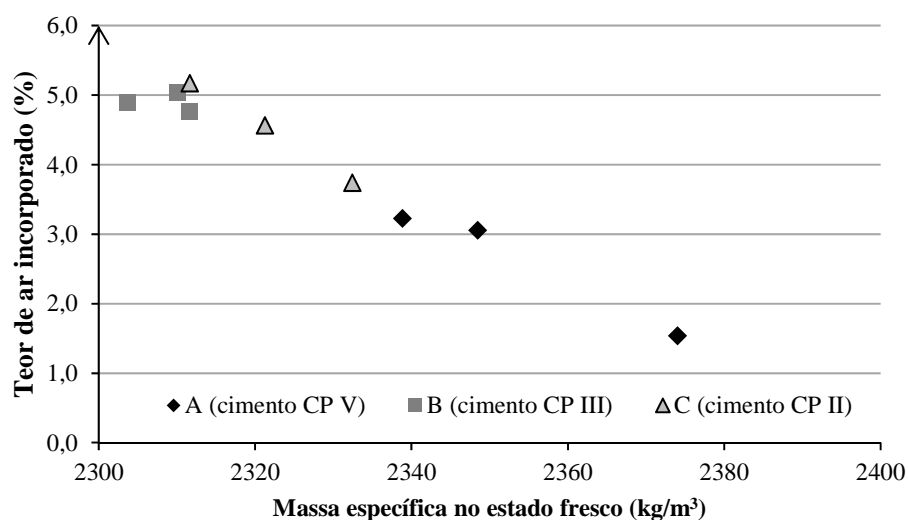
Os concretos desenvolvidos apresentaram trabalhabilidade e coesão adequados para a moldagem dos corpos de prova. A ocorrência de exsudação ou segregação dos materiais não foi observada. Os ensaio para determinar as propriedades dos concretos no estado fresco (massa específica e o teor de ar incorporado) foi realizado logo após a produção do concreto em betoneira, para evitar a perda de trabalhabilidade e o comprometimento dos resultados dos ensaios.



**Tabela 4.12.** Valores finais do abatimento e do teor de argamassa dos concretos obtidos em laboratório

Série	Tipo de cimento	Concretos	Teor de CBC	Abatimento (mm)	Teor de argamassa
A	CPV ARI RS	AR	0%	65,0	51,30%
		A30	30%	65,0	
		A50	50%	75,0	
B	CPIII 40 RS	BR	0%	70,0	51,30%
		B30	30%	65,0	
		B50	50%	60,0	
C	CPII E 32	CR	0%	70,0	51,30%
		C30	30%	80,0	
		C50	50%	75,0	

A massa específica fresca e o teor de ar incorporado dos concretos foram determinados segundo as recomendações da NBR 9833 [ABNT, 1987]. Foi utilizado um recipiente cilíndrico de 3 dm<sup>3</sup> (4,8 < DMC < 12,5 mm) ao invés do recipiente de 15 dm<sup>3</sup> (12,5 < DMC < 38 mm), apesar da DMC do agregado graúdo ser 19 mm, o que não interferiu na reprodutividade e na validade do ensaio. O enchimento do recipiente foi realizado em duas camadas, com adensamento manual. Os resultados estão apresentados na Figura 4.10.

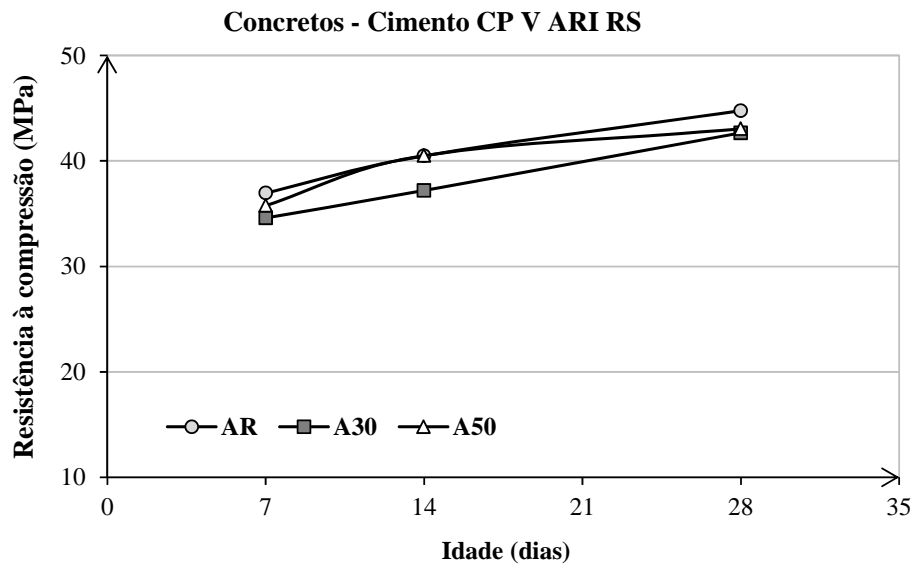


**Figura 4.10.** Concretos – massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco

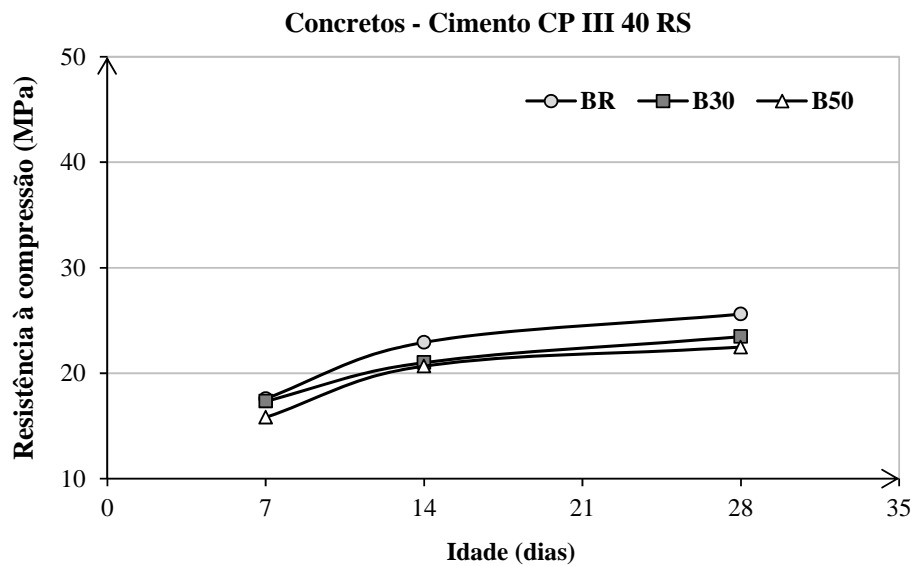
Os valores de massa específica variaram entre 2303,67 kg/m<sup>3</sup> para o concreto B50 (CPIII com 50% CBC) e 2374,07 kg/m<sup>3</sup> para o concreto A50 (CP V com 50% de CBC). O menor valor de

ar incorporado também foi encontrado nos concretos da amostra A50. Segundo Neville [1997] o volume total de vazios de um dado volume de concreto interfere na sua resistência à compressão. O teor ótimo de ar incorporado para concretos moldados com agregado graúdo com dimensão máxima igual a 19 mm e condições severas de exposição é de 6% [ACI, 1977].

A resistência à compressão dos concretos foi determinada seguindo as recomendações da NBR 5739 [ABNT, 1994]. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.11 a 4.13.

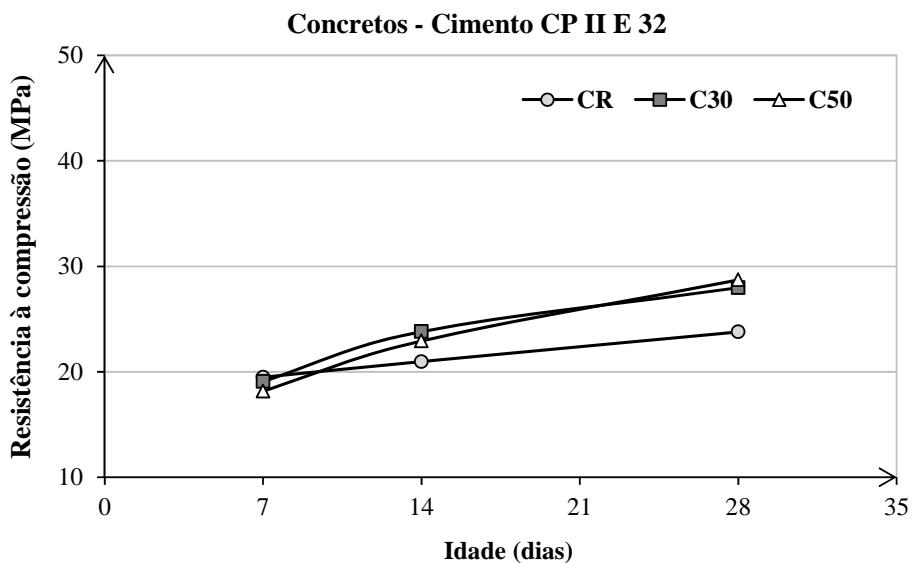


**Figura 4.11.** Valores médios de resistência à compressão dos concretos da série A



**Figura 4.12.** Valores médios de resistência à compressão dos concretos da série B

Nas séries A e B, os valores de referência foram maiores que os valores de resistência dos concretos produzidos com a CBC, aos 28 dias. Para a série A, a diferença ficou em 3,8% entre o concreto AR e A50 e para a série B, a diferença foi maior, e ficou em 12,22% entre o concreto BR e o B50. Na série C, os concretos produzidos com a CBC obtiveram valores de resistência à compressão maiores que o respectivo concreto de referência - CR [Figura 4.13]. Os exemplares do concreto C50 apresentaram valor médio 17,20% maior que as amostras de referência.



**Figura 4.13.** Valores médios de resistência à compressão dos concretos da série C

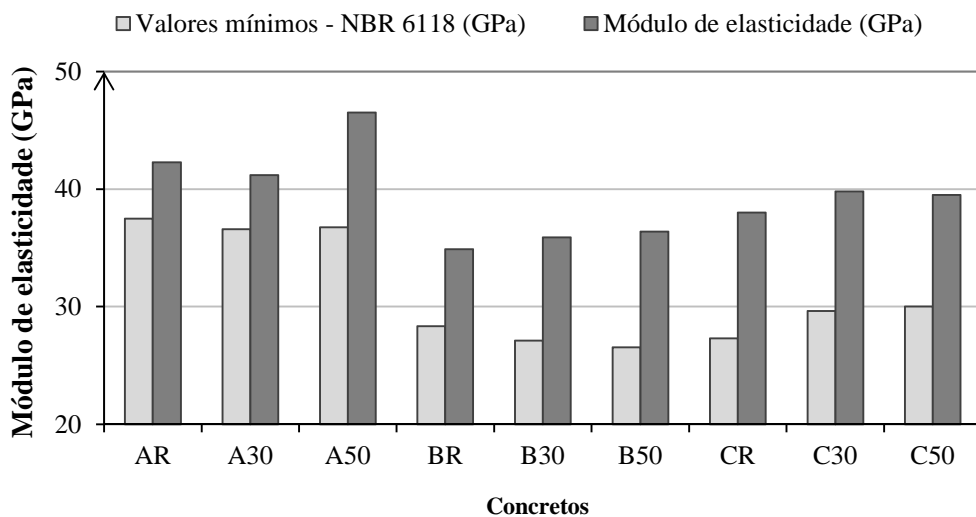
O coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão manteve-se abaixo de 6% para todas as séries, como recomenda a NBR 7215, como mostra a Tabela 4.13 [ABNT, 1996].

Na Figura 4.14 são apresentados os resultados de cada série de concreto. A série C, produzida com cimento CP II E 32, obteve os melhores resultados individuais de resistência à compressão aos 28 dias, se comparado ao valor da resistência de dosagem, no valor de 32 MPa. Os concretos da série B, produzidos com o CP III 40 RS, obtiveram os resultados menos expressivos e não conseguiram ultrapassar o valor de 30 MPa, que é apenas 75% da resistência de dosagem inicial.

**Tabela 4.13.** Valores de resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias

Série	Média (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
AR	44,77	0,34	0,76
A30	42,67	2,14	5,03
A50	43,05	0,85	1,97
BR	25,61	0,56	2,17
B30	23,47	0,59	2,51
B50	22,47	0,92	4,11
CR	23,78	0,87	3,64
C30	27,98	0,74	2,66
C50	28,72	0,66	2,31

Os valores dos módulos de elasticidade variaram entre 34,9 GPa (Concreto BR) e 46,5 GPa (Concreto A50). Os resultados são apresentados na Figura 4.14.



**Figura 4.14.** Valores médios do módulo de elasticidade dos concretos, aos 28 dias

A norma NBR 6118 [ABNT, 2004] apresenta o cálculo estimado do valor do módulo de elasticidade, pela Equação 1.

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad \text{Eq. 1}$$

No qual:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade (MPa);

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto (MPa).

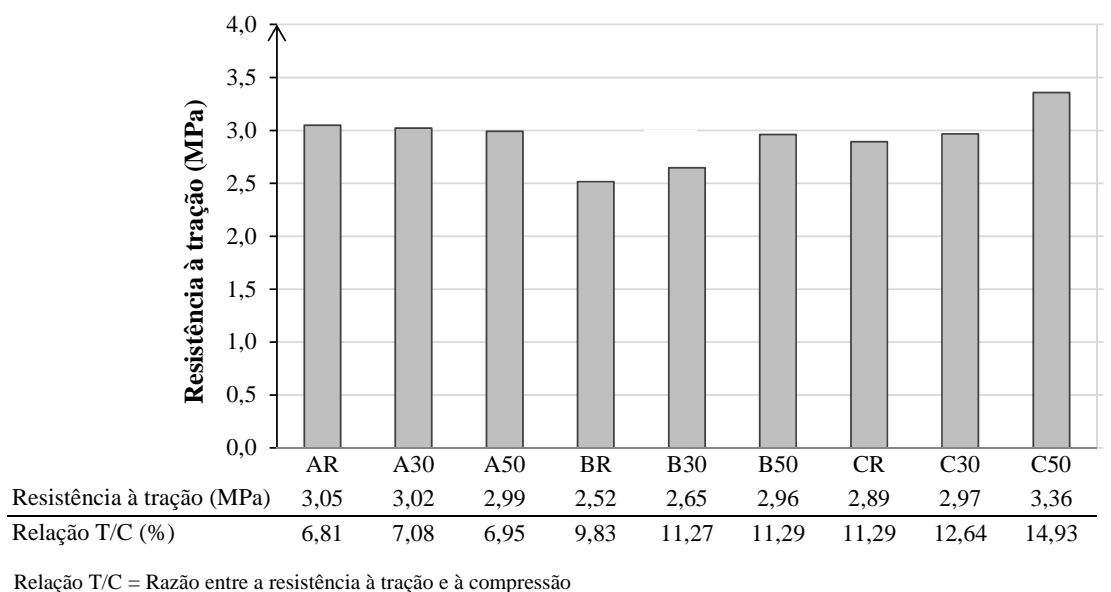
Por meio dessa equação foram calculados os valores estabelecidos pela NBR 6118 [ABNT, 2004] e constatou-se que todos os valores obtidos em ensaio ficaram acima dos valores estabelecidos pela referida norma [Tabela 4.14]. Os concretos A50, B50 e C30 apresentaram os maiores resultados individuais em suas séries.

**Tabela 4.14.** Valores dos módulos de elasticidade dos concretos obtidos em laboratório em comparação com os valores mínimos da NBR 6118, aos 28 dias

Concretos	Módulo de elasticidade (GPa)		Relação Ensaio/ Norma
	Ensaio - 28 dias	Norma NBR 6118	
AR	42,27	37,47	1,128
A30	41,20	36,58	1,126
A50	46,50	36,74	1,265
BR	34,90	28,34	1,231
B30	35,90	27,13	1,323
B50	36,40	26,55	1,370
CR	38,00	27,31	1,391
C30	39,80	29,62	1,343
C50	39,50	30,01	1,316

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral encontram-se na Figura 4.15. Segundo Mehta e Monteiro [1994], a resistência à tração depende do nível geral de resistência à compressão e quanto maior for a resistência à compressão, menor será a relação entre estas duas propriedades. Sendo assim, a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão é de 10-11% para o concreto de baixa resistência, 8-9% para o concreto de média resistência e de 7% para o concreto de alta resistência.

Pode-se notar, pela Figura 4.16, que os menores valores para a relação  $R_t/R_c$  são encontrados nos concretos da série A e os maiores valores para a série C, o que está de acordo com a literatura consultada [MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997]. Já os concretos da série B se comportaram quase como os da série C, ainda que sua resistência de dosagem tenha sido de 40 MPa.



**Figura 4.15.** Resistência à tração por compressão diametral e a relação da resistência à compressão pela resistência à tração dos concretos, aos 28 dias

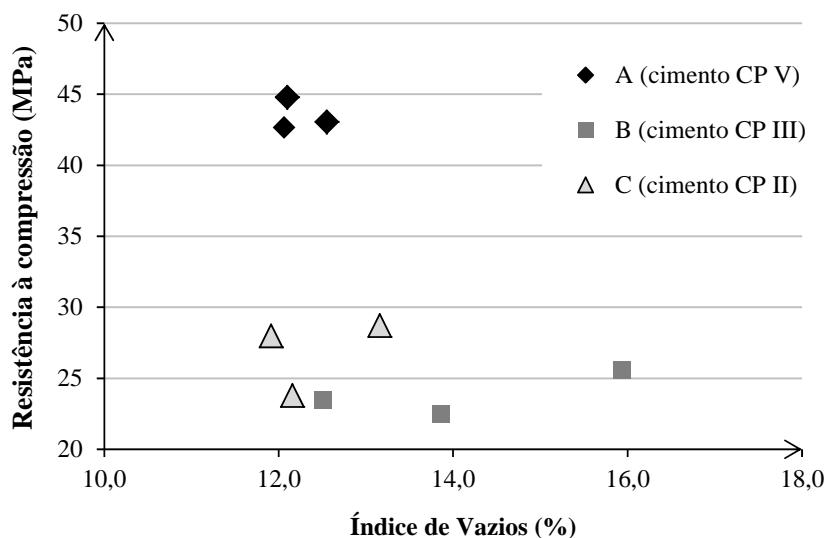
O ensaio de índice de vazios e absorção dos concretos foi realizado, segundo as recomendações da norma NBR 9778 [ABNT, 1987], nos concretos com idade de 28 dias. Os resultados encontram-se na Tabela 4.15.

**Tabela 4.15.** Valores do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica no estado endurecido

Concretos	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
AR	5,09	12,10	2378,48
A30	5,06	12,06	2382,50
A50	5,29	12,55	2374,47
BR	6,85	15,93	2327,07
B30	5,33	12,51	2349,29
B50	5,96	13,87	2328,95
CR	5,14	12,16	2365,55
C30	5,01	11,92	2379,85
C50	5,58	13,16	2356,43

O concreto C30 apresentou o menor teor de vazios e também o menor valor de absorção entre todos os traços. Na Figura 4.16, é apresentada a relação entre o índice de vazios e a resistência à compressão dos concretos. Os traços da série B apresentaram os maiores índices de vazios em relação aos menores valores de resistência à compressão. Ainda assim, o aumento da

substituição da areia por CBC contribuiu para a diminuição do índice de vazios nos concretos da série B.



**Figura 4.16.** Relação entre a resistência à compressão e o índice de vazios dos concretos no estado endurecido

Os valores de massa específica no estado endurecido ficaram, com pequenas variações, em torno de  $2400 \text{ kg/m}^3$ , que é o valor usual para os concretos convencionais.

#### 4.4. Análise da durabilidade dos concretos

A partir dos resultados dos ensaios físicos e mecânicos dos concretos, deu-se continuidade à análise da verificação da profundidade de carbonatação natural, da abrasão, da condutividade térmica e da reatividade potencial álcali-agregado.

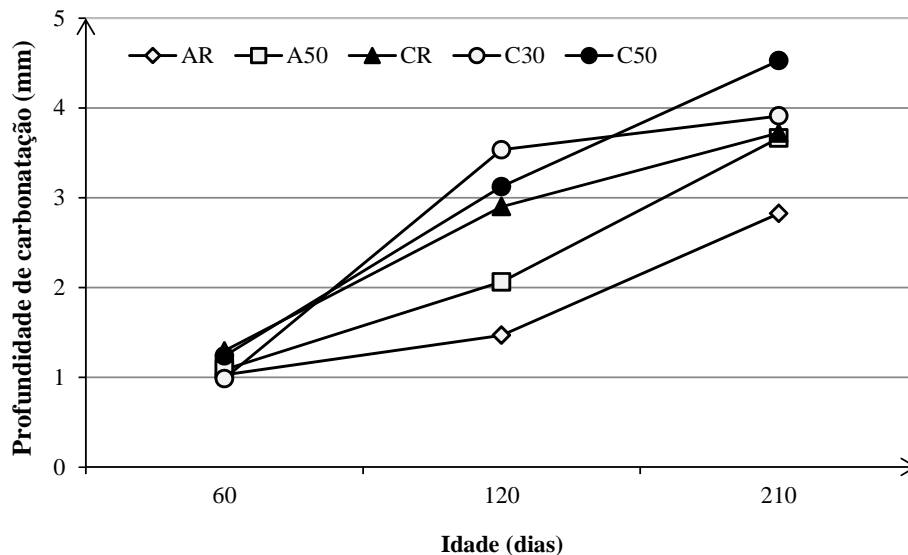
Sabe-se que, quanto menor a resistência à compressão, maior será o teor de vazios de um concreto e maior será sua frente de carbonatação, pois os poros podem facilitar a entrada de  $\text{CO}_2$  no material e, por consequência, desencadear a reação com seus componentes [ATIS, 2004]. Desse modo, os concretos da série B foram desconsiderados para os ensaios subsequentes pelos maiores índices de vazios observados, além das menores resistências a compressão, comparando-se aos valores obtidos para o concreto de referência.

No ensaio de carbonatação natural, os corpos de prova foram rompidos diametralmente na respectiva idade de ensaio, e as superfícies foram tratadas com a solução de fenolftaleína [Figura 4.17].



**Figura 4.17.** Corpos de prova rompidos e tratados com a fenolftaleína – ensaio de carbonatação natural

Os resultados da medição da frente de carbonatação dos concretos são apresentados nos gráficos da Figura 4.18. Os valores do coeficiente de variação dos resultados ficaram em torno de 15-20% para todos os concretos, nas três idades.



**Figura 4.18.** Valores de profundidade de carbonatação dos concretos em estudo

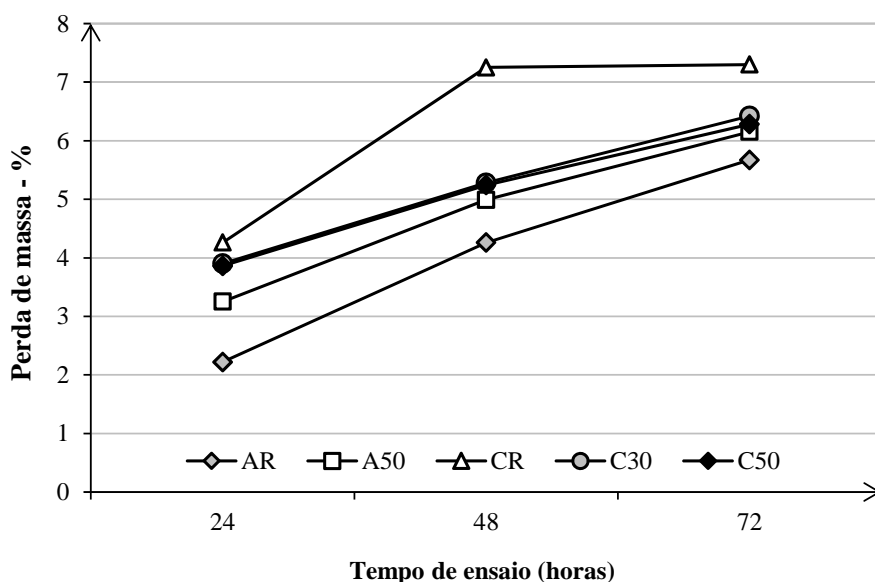
Todas as amostras produzidas com a CBC obtiveram valores de profundidade de carbonatação maiores que os respectivos concretos de referência, porém os valores de



profundidade de carbonatação da amostra C30 e da amostra CR ficaram muito próximos dos valores do concreto de referência, na idade de 210 dias.

No caso dos concretos com CBC, a acidez das amostras de CBC pode ter influenciado a redução da alcalinidade do concreto, o que facilitou o avanço da frente de carbonatação. Análises de solubilização [NBR 10005/2004] e lixiviação [NBR 10006/2004] realizadas na amostra de CBC, utilizada nos concretos, apresentaram valores na ordem de 7,8 para o pH do solubilizado e de 4,96 para o pH do lixiviado.

Em relação ao ensaio de desgaste superficial por abrasão, os resultados estão apresentados no gráfico da Figura 4.19. Os concretos produzidos com o cimento CP V tiveram, em média, desempenho superior aos concretos produzidos com o cimento composto CP II.



**Figura 4.19.** Valores da perda de massa dos concretos por meio do ensaio de abrasão

Após 72 h de ensaio, as amostras produzidas com a CBC obtiveram valores médios de perda de massa muito próximos, entre 6,15% para o A50 e 6,42% para o C30. Esses valores podem ser considerados equivalentes entre si. Nota-se que o desgaste superficial foi semelhante ao desgaste observado nos concretos produzidos com a CBC.

Na Figura 4.20 pode ser observado o aspecto dos corpos de prova submetidos ao ensaio de abrasão, após 72 h. Observou-se o mesmo comportamento ao desgaste superficial tanto para

os concretos de referência como para os concretos com CBC, ou seja, a resistência ao desgaste superficial aumentou com o incremento da resistência à compressão.



**Figura 4.20.** Corpos de prova de concreto submetidos ao ensaio de abrasão, após 72 h

Siddique [2003] estudou concretos produzidos com cinza volante (classe F) em substituição ao agregado miúdo e atestou que a resistência ao desgaste aumentou com o aumento da resistência à compressão.

Em relação à abrasão e à carbonatação, apresenta-se na Tabela 4.16 um resumo dos desempenhos de concretos das séries A e C, comparando-os aos valores de resistência à compressão obtidos para cada teor de substituição de CBC estudado.

**Tabela 4.16.** Resumo dos valores obtidos nos ensaios relacionados à avaliação da durabilidade

Traço	Teor de CBC (%)	Resistência à compressão, 28 dias (MPa)	Profundidade de carbonatação, 210 dias (mm)	Abrasão superficial, 72 horas (%)
AR	0%	<i>44,77</i>	2,82	5,67
A50	50%	43,05	3,66	6,15
CR	0%	23,78	3,72	7,30
C30	30%	27,98	3,91	6,42
C50	50%	28,72	4,53	6,28

\* valores em itálico – melhor resultados de cada série

Pode-se observar um melhor desempenho, na série A, do concreto de referência (AR) em relação ao concreto com CBC. Na série C, o concreto produzido com 50% de CBC obteve melhores valores de resistência à compressão e abrasão, apenas não superando o concreto de referência de sua série em relação à profundidade de carbonatação.

Os valores da condutividade térmica, aos 60 dias, dos concretos estudados estão apresentados na Tabela 4.17.

**Tabela 4.17.** Valores de condutividade térmica dos concretos, aos 60 dias

Série	Teor de CBC (%)	Média (W/mK)	Desvio Padrão
AR	0%	1,60	0,076
A50	50%	1,43	0,099
CR	0%	1,52	0,124
C30	30%	1,59	0,022
C50	50%	1,72	0,036

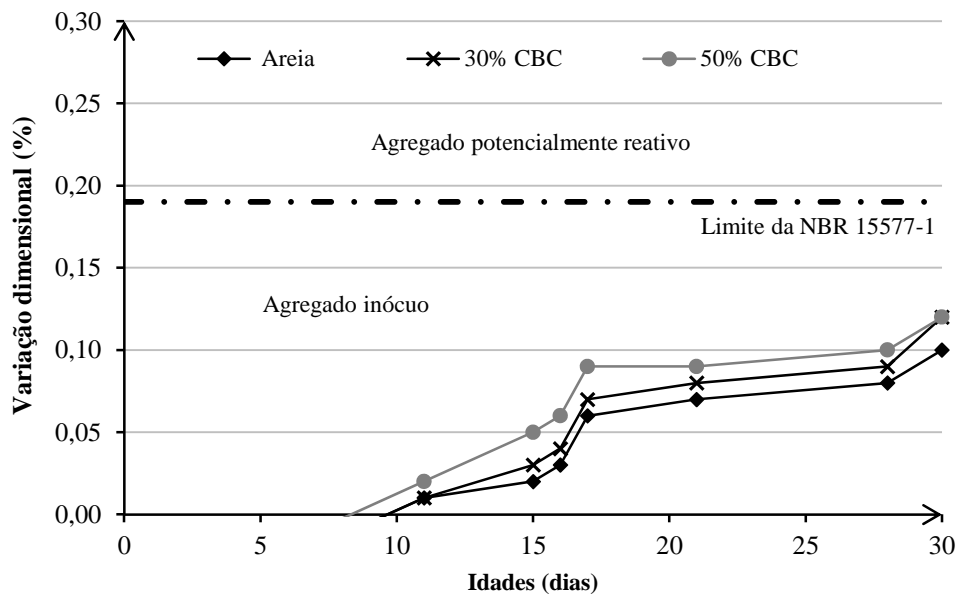
A amostra A50 obteve o menor valor de condutividade térmica entre os concretos analisados. Todos os concretos obtiveram valores inferiores aos estipulados pela norma NBR 15220 [ABNT, 2005] para concretos convencionais com massa específica entre 2200 e 2400 kg/dm<sup>3</sup>, segundo a Tabela 4.18.

**Tabela 4.18.** Valores de condutividade térmica dos concretos de acordo com norma NBR 15220

Massa Especifica (kg/dm <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica (W/mK)	Observações
2200 - 2400	1,75	-
1600 - 1800	1,05	Dosagem de cimento > 300 kg/m <sup>3</sup> ; e densidade de massa aparente dos inertes > 350 kg/m <sup>3</sup>
1400 - 1600	0,85	
1200 - 1400	0,70	
1000 - 1200	0,46	

Pode-se concluir que a substituição de areia por CBC não interferiu de forma significativa na magnitude da condutividade térmica dos concretos analisados, o que se trata de um resultado satisfatório do ponto de vista da inércia térmica. Quanto menos calor foi conduzido pelo material, mais adequado o seu uso em locais expostos a radiação solar e outras fontes de calor. Acrescenta-se, ainda, que todos os valores encontrados ficaram abaixo daqueles requeridos pela normalização brasileira.

Em relação à análise de reatividade potencial, os resultados são apresentados na Figura 4.21. As amostras produzidas com 30% e 50% de CBC registraram expansão 20% acima das amostras de referência produzidas apenas com a areia natural, aos 30 dias. Aos 16 dias, todas as amostras apresentaram expansões abaixo de 0,10%.



**Figura 4.21.** Expansão dos corpos de prova de argamassa até a idade de 30 dias.

Expansões inferiores a 0,10%, aos 16 dias, indicam a mitigação da reação álcali-sílica, caso sejam superiores, são necessários novos ensaios com novas misturas. Mesmo assim, o valor de 0,12% de expansão está bem abaixo do valor de 0,19%, que é o limite para que um agregado comece a apresentar expansões potencialmente prejudiciais, aos 30 dias [ABNT, 2008].

Höehr et al. [2010] registraram valores de expansão acima de 0,60% em argamassas produzidas com o cimento-padrão e 15% de cinza de casca de arroz natural, aos 30 dias. Os autores conseguiram mitigar esses valores com a adição de até 40% de cinza volante e o uso de cimento pozolânicos.

Dessa forma, pode-se afirmar que as amostras de CBC utilizadas nesta pesquisa não apresentam risco de causar expansões no concreto provenientes da reação álcali-sílica.

## 4.5. Análise dos metais pesados presentes no concreto

O resultado das análises de lixiviação e solubilização das amostras de cinza do bagaço da cana-de-açúcar encontram-se nas Tabelas 4.19 e 4.20.

**Tabela 4.19.** Parâmetros acima do limite permitido para o extrato lixiviado (CBC-J)

Parâmetro	CBC – J (amostra 1)	Limite máximo no extrato (mg/L)	Limite de detecção (LD)
Arsênio	< LD	1,00	0,0001
Bário	0,80	70,0	0,001
Cádmio	0,007	0,50	0,0006
Chumbo	0,01	1,00	0,01
Cromo total	0,040	5,00	0,005
Fluoretos	0,11	150,0	0,01
Mercúrio	< LD	0,10	0,0001
Prata	0,009	5,00	0,001
Selênio	< LD	1,00	0,001
pH do lixiviado	4,96	N.A.	0

**Tabela 4.20.** Parâmetros acima do limite permitido para o extrato solubilizado (CBC-J)

Parâmetro	CBC - J (amostra 1)	CBC - J (amostra 2)	Limite máximo no extrato (mg/l)	Limite de detecção (LD)
Alumínio	<i>0,25</i>	<i>0,47</i>	0,20	0,01
Bário	-	< LD	0,70	0,05
Cádmio	<i>0,028</i>	<i>0,008</i>	0,005	0,0006
Chumbo	<i>0,26</i>	<i>0,05</i>	0,01	0,01
Cromo total	< LD	< LD	0,05	0,005
Fenóis totais	< LD	<i>0,026</i>	0,01	0,001
Ph do solubilizado	7,78	9,17	-	-

\* Valores *em itálico* – acima do limite permitido

O ensaios de solubilização foi repetido para a mesma amostra (CBC-J) em função dos valores acima do limite permitido pela NBR 10006. Apesar da alteração nos valores do ensaio de solubilização, os resultados do extrato lixiviado se mantiveram dentro do limite para o grupo dos componentes inorgânicos, segundo o Anexo F, da NBR 10004. Dessa forma, os concretos foram analisados apenas em relação ao ensaio de solubilização.

As amostras de CBC-J foram classificadas, pelos parâmetros ora apresentados, como “Resíduo Não perigoso – Classe II A – Não inerte”. Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Em relação à análise dos concretos pelo ensaio de solubilização [NBR 10005/2004], os resultados dos elementos, que foram detectados acima do limite máximo determinado pela citada norma, encontram-se na Tabela 4.20.

Na CBC, os elementos alumínio, cádmio e chumbo foram encontrados nas duas amostras analisadas, pertencentes à mesma usina. Em outras amostras de CBC, também do estado de São Paulo, esses mesmos elementos aparecem em concentração acima do limite estabelecido pela norma [LIMA et al., 2009].

**Tabela 4.21.** Parâmetros acima do limite permitido para o extrato solubilizado (concretos)

Parâmetro	Concreto AR	Concreto A50	Concreto CR	Concreto C30	Concreto C50	Limite máximo no extrato (mg/l)	Limite de detecção (LD)
Alumínio	<i>0,67</i>	<i>0,73</i>	<i>0,85</i>	<i>1,71</i>	<i>0,97</i>	0,20	0,01
Bário	<i>1,03</i>	<i>0,86</i>	<i>0,90</i>	<i>1,08</i>	<i>0,94</i>	0,70	0,05
Cádmio	<i>0,008</i>	< LD	<i>0,015</i>	0,004	<i>0,018</i>	0,005	0,0006
Chumbo	<i>0,12</i>	0,01	<i>0,03</i>	<i>0,06</i>	<i>0,02</i>	0,01	0,01
Cromo total	<i>0,054</i>	0,031	0,027	0,017	0,011	0,05	0,005
Fenóis totais	<i>0,039</i>	<i>0,026</i>	<i>0,052</i>	<i>0,056</i>	<i>0,031</i>	0,01	0,001
Ph do solubilizado	12,02	11,98	11,93	12,32	12,33	-	-

\* Valores *em itálico* – acima do limite permitido

Nos concretos, nota-se que a concentração de alumínio aumentou em relação aos valores das amostras de CBC. O bário e o cromo aparecem em concentração um pouco acima do limite, nos concretos, mas não aparecem nas amostras de CBC. Isso mostra que a origem desses metais pode estar no cimento Portland, na água ou nos agregados naturais utilizados. Sabe-se que as fábricas de cimento queimam pneus inservíveis e outros resíduos para obter energia nos fornos de clínquer, o que pode ser a origem dos metais pesados no cimento e, conseqüentemente, nos concretos e argamassas [TREZZA e SCIAN, 2007].

O elemento cromo também apareceu nas amostras de concreto, porém somente ficou acima do limite de 0,05 mg/l no concreto AR. Nota-se que a presença da CBC diminuiu a concentração de cromo nos concretos, com uma pequena diminuição da concentração desse metal no concreto A50, em relação ao AR, em torno de 40%, e nos concretos C30 e C50, em relação ao CR, em torno de 50%.

O elemento cádmio apresentou uma grande variação nas amostras de concreto e de CBC analisadas. Sendo assim, não foi possível estabelecer a origem desse metal nas amostras, se está relacionada à CBC, aos agregados ou ao cimento.

O Ph do extrato solubilizado dos concretos se manteve entre 11,9 e 12,3, o que mostra que a CBC não afetou a alcalinidade da matriz cimentícia. Com o Ph do concreto entre 12 e 14 e na presença de oxigênio, o aço se recobre de uma capa de óxidos muito aderente, compacta e praticamente invisível, denominada película passivante, que o protege da corrosão [KAZMIERCZAK e HELENE, 1993].

#### **4.6. Análise da viabilidade econômica dos concretos**

Para a composição do custo final total de cada concreto foi acrescentado o gasto energético da betoneira (potência 0,5 cv; capacidade 60 litros), que foi utilizada na preparação dos concretos. O tempo de utilização total para cada 30 litros de concreto foi de 5 minutos.

O valor final do concreto produzido com 50% de CBC ficou ligeiramente maior que o concreto de referência. Isso mostra que é viável a utilização da CBC em uma distância de até 100 km a partir da usina de cana-de-açúcar.

Essa viabilidade econômica também só foi possível por conta do baixo processamento da cinza, com apenas uma etapa de secagem e outra de moagem. As pesquisas que buscam o aproveitamento de cinzas agroindustriais como substituto do cimento Portland precisam submeter as amostras a um tempo elevado de moagem (acima de 4 horas), o que inviabiliza o uso do resíduo na construção civil.

Além da cotação dos insumos, foi realizada uma análise do Índice Custo/Resistência - ICR, que mostrou que o ICR dos concretos produzidos com a CBC ficou menor que o concreto de referência. A Tabela 4.21 apresenta os preços dos insumos utilizados na análise e o ICR de cada concreto.

O concreto C50 obteve um valor de ICR 16,4% menor que o concreto CR. Isso mostra que, apesar do uso da CBC não ter diminuído muito o valor final do m<sup>3</sup> do concreto, o ganho em relação ao desempenho mecânico foi maior. Além desta vantagem econômica, salienta-se o menor uso de agregados naturais (no caso, a areia) para se obter um concreto com maior resistência final.

**Tabela 4.22.** Preços dos insumos considerados no valor global de cada concreto

Tipo de concreto	Material	Preço dos insumos (R\$/kg)	Fração de cada insumo em relação ao traço (%)	Preço (R\$/m <sup>3</sup> )	ICR (R\$/MPa)
CR	Cimento	0,4033	10,19	171,15	<b>7,20</b>
	Areia	0,0204	25,15		
	Brita	0,0375	48,72		
	Água	0,0119	15,94		
C30	Cimento	0,4033	10,18	172,34	<b>6,16</b>
	Areia	0,0204	17,63		
	Brita	0,0375	48,67		
	CBC	0,0275	7,29		
	Água	0,0119	16,24		
C50	Cimento	0,4033	10,15	172,84	<b>6,02</b>
	Areia	0,0204	12,59		
	Brita	0,0375	48,53		
	CBC	0,0275	12,23		
	Água	0,0119	16,49		

Em várias regiões do Brasil, o custo da areia encontra-se bastante elevado devido à dificuldade em se conseguir novas licenças ambientais para extração em mananciais, o que favoreceria o uso de resíduos regionais em substituição ao agregado miúdo.



## 4.7. Análise do artefato produzido com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar

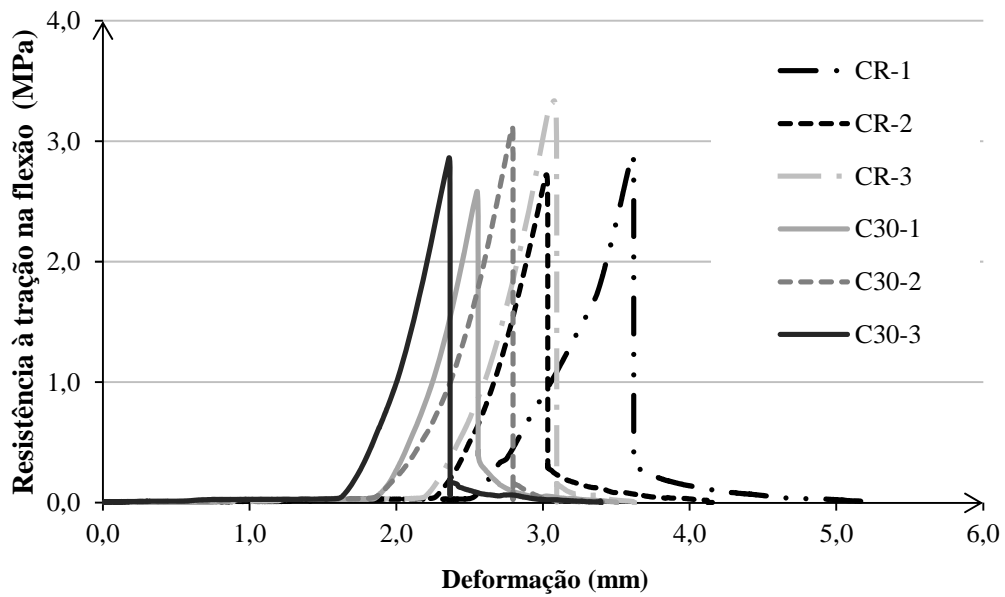
Os valores de resistência à tração na flexão dos prismas são apresentados na Tabela 4.22. Os resultados das três séries de concretos ficaram muito próximos entre si, assim como os valores do coeficiente de variação entre as três amostras, o que comprova a homogeneidade dos resultados. Todos os prismas tiveram a ruptura dentro do terço médio, o que torna todas as amostras válidas.

**Tabela 4.23.** Resultados do ensaio de resistência à flexão dos prismas

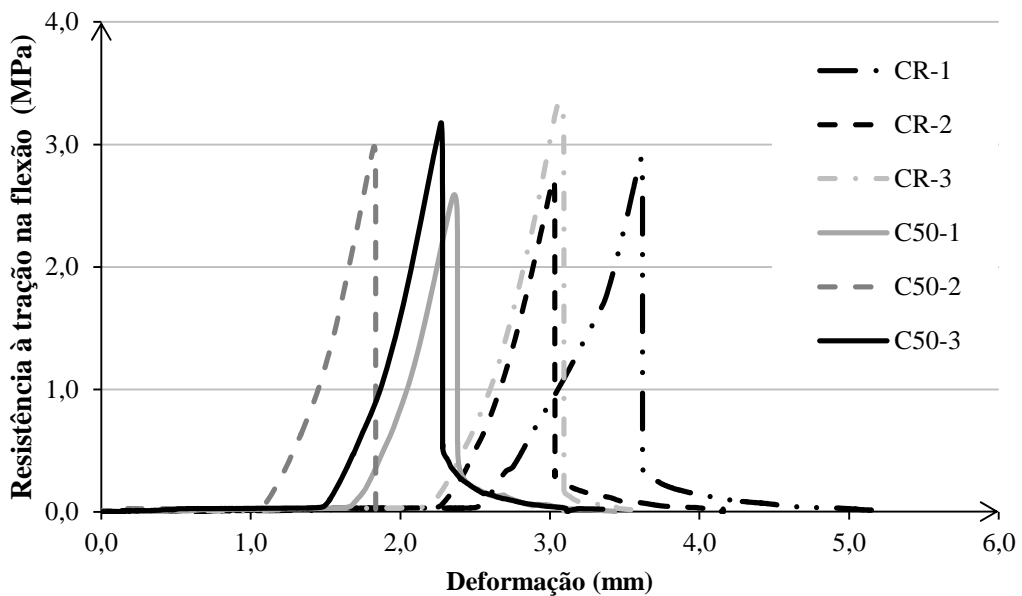
Concreto	CBC (%)	Média (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
CR	0%	2,98	10,69
C30	30%	2,86	9,32
C50	50%	2,92	10,25

Enquanto todos os valores de resistência à tração na flexão ficaram próximos entre si (entre 2,86 MPa e 2,98 MPa), a deformação na ruptura foi menor para os concretos produzidos com a CBC, o que indica que a adição de cinza nos concretos diminuiu a ductilidade dos mesmos [Figuras 4.22 e 4.23]. Um dos prismas do concreto C50 obteve um valor de deformação, em média, 50% menor que o concreto de referência, o que demonstrou que os concretos com cinza se deformaram bem menos antes de se romper. Esse fato foi confirmado, também, pelo ensaio do módulo de elasticidade, que comprovou que a adição de CBC aumentou a rigidez dos concretos.

Em se tratando de um concreto avaliado para produção de guias para pavimentação, seja ele moldado “in loco” ou pré-moldado, a resistência à flexão do concreto é mais importante durante as etapas de desmoldagem e transporte da peça, pela atuação do peso próprio. No caso das guias extrudadas, o esforço de flexão é inexistente.



**Figura 4.22.** Resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com 30% de CBC em comparação aos concretos de referência



**Figura 4.23.** Resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com 50% de CBC em comparação aos concretos de referência

Publicação técnica da Prefeitura Municipal de São Paulo <sup>1</sup> estabelece um  $f_{ck}$  de 20 MPa para as guias retas padrão PMSP-100, que devem ter comprimento de 100 cm ( $\pm 2$  cm), largura da base de 15 cm ( $\pm 0,5$  cm), altura de 30 cm ( $\pm 2$  cm) e largura do topo de 13 cm ( $\pm 0,5$  cm). A norma ES-290 [DNER, 1997] estabelece que o concreto usado na produção de meios-fios e

<sup>1</sup> PMSP. Disponível em: <<http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/subprefeituras/>>. Acessado em 3 mar. 2010.

guias precisa atingir a resistência à compressão mínima de 11 MPa, aos 28 dias. A norma 020-ES [DNIT, 2006] estipula um valor mínimo de 15 MPa para a mesma idade.

Sendo assim, pode-se determinar que todos os concretos produzidos com a CBC podem ser utilizados na fabricação de elementos de drenagem, como guias e sarjetas. Todos os concretos da série C alcançaram valores de resistência à compressão acima de 25 MPa, aos 28 dias.

Após a moldagem e o transporte, uma vez que a peça esteja em uso, o seu peso próprio ficará distribuído linearmente pelo pavimento, o que anulará os esforços de flexão. Considerando uma guia padrão com dimensões 15x30x100 cm (base x altura x comprimento) e concreto com massa específica seca no valor de 2350 kg/m<sup>3</sup> (LIMA et al., 2010), o peso próprio de cada guia fica em 1,05 kN, em média, 20 vezes menor que a força máxima de ruptura dos prismas.

Dessa forma, as guias de pavimentação produzidas por esta pesquisa obtiveram resistência mecânica suficiente para serem desmoldadas, transportadas e acondicionadas antes do uso, da mesma forma que as guias de pavimentação pré-moldadas convencionais. A Figura 4.24 mostra o aspecto final das guias depois da cura de 28 dias.



**Figura 4.24.** Guia e miniguia depois da desmoldagem

Essas guias podem ser utilizadas na drenagem de vias nas cidades e em rodovias de trânsito pesado e possuem durabilidade similar às guias produzidas com concreto convencional.

# 5

## Conclusões

---

A partir dos resultados e discussões realizadas foi possível concatenar conclusões a respeito da viabilidade do uso da CBC em substituição ao agregado miúdo na produção de artefatos em concretos e argamassas para infraestrutura urbana.

Segundo parâmetros físicos, pode-se concluir que a cinza pode ser equiparada a areia natural. As amostras analisadas podem ser utilizadas como material substituto da areia, por não apresentarem pozolanicidade.

Os concretos produzidos com 30% e 50% de CBC e o cimento CP II E 32 (Série C) apresentaram os melhores valores em relação aos ensaios realizados. Cabe salientar que o uso da CBC aumentou a rigidez dos concretos, mas não ao ponto de interferir no seu emprego em artefatos para infraestrutura.

A substituição de areia por CBC não interferiu de forma significativa na durabilidade dos concretos analisados. Pela análise de lixiviação e solubilização, pode-se concluir que a CBC não afetou a alcalinidade da matriz cimentícia. Em relação aos riscos ao meio ambiente, a CBC é um resíduo passível de ser utilizado em matrizes cimentícias como substituto parcial do agregado miúdo.

O uso da CBC não diminuiu significativamente o valor final do m<sup>3</sup> do concreto e o ganho em relação ao desempenho mecânico foi maior.

As guias de pavimentação produzidas por esta pesquisa obtiveram resistência mecânica suficiente para serem desmoldadas, transportadas e acondicionadas antes do uso, da mesma forma que as guias de pavimentação pré-moldadas convencionais.

Por meio dessas constatações, afirma-se que a CBC pode ser usada como substituto parcial do agregado miúdo em concretos produzidos com o cimento CP II E 32. O teor de substituição que proporcionou melhores valores aos ensaios mecânicos foi o de 30%, em massa. Portanto,

a CBC pode ser utilizada na produção de artefatos, com qualidade compatível com as exigências da construção civil nacional e com ganhos significativos em termos ambientais e econômicos.

# 6

## Sugestões para a continuidade do trabalho

---

Este trabalho apresentou os resultados da aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em concretos, enfocando, além dos aspectos mecânicos, resultados da viabilidade ambiental e econômica da aplicação desse resíduo como substituto do agregado miúdo. Portanto, no desenvolvimento dos concretos e argamassas não foram utilizados aditivos complementares, para que os resultados obtidos não ficassem vinculados ao uso destes materiais.

É possível melhorar as propriedades dos concretos produzidos com a CBC. Para tanto, com base nos resultados e nas conclusões obtidas, são oferecidas algumas sugestões para a continuidade deste trabalho:

- Utilizar a CBC em substituição a agregados miúdos de menor granulometria (areia fina) a fim de que a interação entre os dois materiais seja melhor analisada;
- Diminuir o teor de cimento dos concretos para valores abaixo de  $300 \text{ kg/m}^3$ , utilizando aditivos (plastificantes ou superplastificantes) e diminuindo a relação a/c, de modo a otimizar as propriedades dos concretos com um menor consumo de cimento;
- Realizar ensaios de carbonatação acelerada nos concretos produzidos com a CBC, de modo a analisar idades mais avançadas ( $t > 300$  dias) e produzir uma curva de estabilização dos efeitos do  $\text{CO}_2$  nos concretos;
- Produzir concretos com a CBC utilizando o cimento CP III 40 RS e analisar suas propriedades em idades mais avançadas (acima de 90 dias). Neste trabalho, os concretos da série B foram analisados em idades de até 28 dias;
- Produzir artefatos com armadura de aço (bancos de praça, placas de cobertura para pontos de ônibus, etc.) e analisar o potencial de corrosão dos concretos produzidos com a CBC.



## Referências

---

- AGÊNCIA EMBRAPA. **Processamento da cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/>>. Acesso em 11 nov. 2009.
- 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.
- AL-AKHRAS, N. M.; ABU-ALFOUL, B. A. Effect of wheat straw ash on mechanical properties of autoclaved mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 859-863, 2002.
- AL-RAWAS, A. A.; HAGO, A. W.; TAHA, R.; AL-KHAROUSI, K. Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars. **Building and Environment**, n. 40, p. 1261-1266, 2005.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **ACI 211.1** - Recommended practice for selecting proportions for normal and heavy weight concrete. Detroit, 1977. 23p.
- \_\_\_\_\_. **ACI 201.2R** - Guide to durable concrete. Detroit, 2002. 41p.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **ASTM C 618**: Concreto: uso de cinza volante ou pozolanas natural ou calcinada (Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete). West Conshohocken: ASTM, 2005.
- \_\_\_\_\_. **ASTM C 1138**: Concreto: determinação da resistência à abrasão de concreto (Standard test method for abrasion resistance of concrete - Underwater Method). West Conshohocken: ASTM, 2005.
- ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**, 2 ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.
- ANDRADE, L. B. **Metodologia de avaliação do uso de cinzas pesadas de termelétrica como agregado natural para concreto**. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - UFSC, 2004.
- ANDRADE, L. B.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Evaluation of concrete incorporating bottom ash as natural aggregates replacement. **Waste Management** (Elmsford), v. 27, n. 9, pp. 1190-1199. 2007.
- ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F.; SALDIVA, P. H. N. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, p. 158-175, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.



- \_\_\_\_. **NBR 5735** - Cimento Portland de alto-forno – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_. **NBR 5737** - Cimento Portland Resistente a Sulfatos. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_. **NBR 5738** - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994a.
- \_\_\_\_. **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994b.
- \_\_\_\_. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_. **NBR 7175** - Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_. **NBR 7211** – Agregados para concretos. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_. **NBR 7214** - Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_. **NBR 7215** - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_. **NBR 7222** - Argamassas e 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 do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_. **NBR 8522** – Concreto- Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão - deformação. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_. **NBR 8953** - Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_. **NBR 9778** - Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_. **NBR 9833** - Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_. **NBR 10004** - Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_. **NBR 10005** - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_. **NBR 10006** - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_. **NBR 11578** – Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_. **NBR 12650** - Materiais Pozolânicos – Determinação da variação da retração por secagem devida à utilização de materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. **NBR 12653** - Materiais Pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. **NBR 12655** - Concreto - Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_. **NBR 13278** – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_. **NBR 15220** - Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_. **NBR 15577** - Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_. **NBR 15577** - Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

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 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.

ATIS, C. D. Carbonation-Porosity-Strength Model for Fly Ash Concrete (Technical Note). **Journal of Materials in Civil Engineering**, Technical Note, p. 91-94, jan./feb. 2004.

BARBOZA FILHO, M. P., PRABHU, A. S., 2002, Aplicação de silicato de cálcio na cultura do arroz – **Circular Técnica 51**, Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 4 p.

CANASAT. **Mapa do cultivo da cana-de-açúcar no Centro-sul: Safra 2010**, Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 21 jul. 2011.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassa**. Rio de Janeiro, 2005. 78p. Dissertação (Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CESNIK, R. **Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil.** Disponível em: [http://www.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/344.pdf](http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/344.pdf). Acesso em: 05 ago. 2008.

CESNIK, R., MIOCQUE, J. **Melhoramento da cana-de-açúcar**, 1 ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004, 307 p.

CHANDRA, S. **Waste materials used in concrete manufacturing.** Building Materials Science Series. ISBN 0-8155-1393-3, 1996.

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C.; PÉRA, J. Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash, **Cement and Concrete Research**, v. 29., n. 9, pp. 1387–1391, 1999.

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, S. T. **Mecanismos para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa: Um modelo para o Estado de SP.** Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1999, 200 p.

COIMBRA, M. A., MORELLI, M. R. Desenvolvimento de argamassas microporosas para a construção civil. **Revista Cerâmica**, v. 45, n. 296, p. 203-206, 1999.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de Safra Brasileira: Cana-de-açúcar, Primeiro Levantamento, Maio/2011 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : CONAB 2011.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>>. Acesso em 25 jun. 2011.

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.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana de açúcar com cimento Portland e cal. 2005. In: 47° Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais do 47° CBC.** Olinda, Brasil : 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. M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 110-115, 2009.

CYR M.; LUDMANN, C. Low risk meat and bone meal (MBM) bottom ash in mortars as sand replacement. **Cement and Concrete Research**, Vol. 36, 2006, p. 469-480.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. v.1, cap. 12, p. 345-380.

DANIALI, S. Solidification/Stabilization of heavy metals in latex modified Portland cement matrices. **Journal of Hazardous Materials**, n. 24, p. 225-230, 1990.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro** - 2006 (Brazilian Mineral Yearbook 2006). Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (org.). Brasília, v. 34, ISSN 01009303.

DE PAULA, M. O.; TINOCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. In: 49o Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves, RS. **Anais do 49º. CBC**. São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

DI CAMPOS, M. S. **Aproveitamento das cinzas da queima da cama sobreposta de suínos como substituição parcial do cimento Portland**. Pirassununga, 2005. 121f. Dissertação (Mestrado) – FZEA/USP, 2005.

DORSTHORST, B.J.H; HENDRIKS, Ch. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice., São Paulo, 2000. **Proceedings...** São Paulo, EPUSP, 2000.

EMBRAPA Agropecuária. **Experimentos em cana-de-açúcar**. Disponível em: < <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/Abertura.html> >. Acesso em: 27 Abr. 2010.

FAGUNDES, M. V. M. Moeda forte: cada dólar aplicado em esgoto pode valer 100 dólares em saúde. **Revista BIO**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ano 13, n. 26, p. 20-21. 2003. Entrevista.

FARIA, D. F.; OLIVEIRA, P. S. M.; SANTOS, R. J.; ORTEGA, F. S.; ALBERS, A. P. S. Reaproveitamento de resíduos sólidos de indústria química para produção de argamassas. In: IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2005, São José dos Campos. **Anais...**, 2005. p. 440-442.

FERNANDES, M. P. M.; PIMENTEL, U. H. O. O impacto dos RCDs no ambiente urbano. In: II Encontro Nacional sobre Resíduos Sólidos, 2011, Maceió. **Anais do II ENARC**, UFAL : Maceió, AL, 2011.

FERRARIS, M.; SALVO, M.; VENTRELLA, A.; BUZZI, L.; VEGLIA, M. Use of vitrified MSWI bottom ashes for concrete production. **Waste Management**, vol. 29, n. 3, p. 1041-1047, 2009.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa** (bagaço da cana-de-açúcar), São Paulo: FIESP/CIESP, 2001, 90 p.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2005.

FREIRE, W. J. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. / Wesley J. Freire, Luís Augusto B. Cortez – Guaíba : Agropecuária, 2000. 203 p.

FREITAS, C.; GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; GOMES FILHO, C. V.; FERREIRA, E. S. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**, v. 32, no. 4, 913-918, 2009.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement & Concrete Composites**, no. 29, p. 515–524. 2007.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, p. 2086– 2097, 2008.

HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reactions. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, pp. 1525–1536, 1998.

HEBATPURIA, V. M.; ARAFAT, H. A.; RHO, H. S.; BISHOP, P.L.; PINTO, N. G.; BUCHANAN, R. C. Immobilization of phenol in cement-based solidified/stabilized hazardous wastes using regenerated activated carbon: leaching studies. **Journal of Hazardous Materials**, B70, pp. 117–138, 1999.

HÖEHR, G.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.; CERVO, T.; ZERBINO, R.; BOLSON, F.; BORGES, P.; ZANELLA, A. Estudo da mitigação da reação álcali-sílica entre cimento com adições e cinza da casca do arroz natural, pelo método acelerado em argamassas. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Canela. **Anais do XIII ENTAC**, ANTAC : Porto Alegre, 2010.

IAA Instituto do Açúcar e do Alcool. **Cultura da cana-de-açúcar** / Programa de Melhoramento da cana-de-açúcar - Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA. Piracicaba, 1986.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb>. Acesso em: 10 Out. 2007.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2041-2047, 2008a.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2048-2053, 2008b.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p.655-659, 2009.

JENDIROBA, E. Aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. In: **Gestão de resíduos na agricultura e na agroindústria**. / ed. C. Spadotto e W. Ribeiro. – Botucatu : FEPAF, 2006.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: **Workshop – Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção**. São Paulo, 1996. São Paulo: ANTAC. PCC-USP, 1996.

JOHN, V. M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: **Anais do II Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**. São Paulo, 1999. IBRACON, v. 1 p. 44-55, 1999..

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: **Tecnologias e materiais alternativos de construção** / W. J. Freire, A. L. Beraldo (coord.) – Campinas, SP : Ed. UNICAMP, 2003.

JOHN, V. M. Sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem. In: I Fórum das Universidades Públicas Paulistas - Ciência e Tecnologia em resíduos. **Anais...** Lindóia - SP. 2003.

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/Detailhe.jsp?id=50416>>. Acessado em 6 Nov. 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.

LELLES, L. C.; SILVA, E.; GRIFFITH, J. J.; MARTINS, S. V. Perfil ambiental qualitativo da extração de areia em cursos d'água. **Revista Árvore** [online]. 2005, v. 29, n. 3, pp. 439-444. ISSN 0100-6762.

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.; ROSSIGNOLO, J. A.; SAVASTANO JR., H.; FIORELLI, J. Physico-chemical analysis of the cashew nut production waste aiming their use in cement composites. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, Campinas, v.3 n.3, p.191-200, Set/Dez., 2009.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 23, n. 2, p. 1078-1083, 2009.

LORA, E. S., ARRIETA, F. P., CARPIO, R. C. Eletricidade a partir do bagaço de cana. In: Mello, M. G. (ed), **Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais**, 1 ed. Belo Horizonte: LabMídia, 2001. pp. 59-81.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MACEDO, P. C.; CASTALDELLI, V. N.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; FIORITI, C. F.; TASHIMA, M. M.; BERNABEU, J. J. P. Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais do 51º CBC**. Curitiba : IBRACON, 2009.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. - Advances in Concrete Technology, ISSN 1024-5308; vol. 1., 1996.

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.; 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, Brasil.

MARTINS, C. H.; MACHADO, P. H. T. Estudo da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas e concretos. In: ECMEC2010-Encontro Nacional de Materiais e Estruturas Compósitas, 2010, Porto. **Anais do ECMEC 2010**. Porto : Editora da Universidade do Porto, 2010. v. 1. p. 1-1.

MARZOUK, O. Y.; DHEILLY, R.M.; QUENEUDEC, M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. **Waste Management**, v. 27, p. 310–318, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto** – estrutura, propriedades, materiais. São Paulo : PINI, 1994.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Anuário estatístico da agroenergia** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. – Brasília : Mapa/ACS, 2009. 160 p. ISBN 978-85-99851-60-9.

\_\_\_\_. **Produção Brasileira de Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>>. Acesso em 21 jul.2011.

MOREIRA, J. R., GOLDEMBERG, J. The alcohol program, **Energy Policy**, v. 27, n. 4, 1999. pp. 229-245.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 3a ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 416p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo : PINI, 1997.

NOTÍCIAS ÚNICA. **Governo prevê que demanda por etanol crescerá 150% em dez anos no Brasil** [10/02/09]. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticias/show.asp?nwsCode={9047E162-0868-4944-AFE0-5EF90BF72F1A}>>. Acesso em: 27 fev. 2009.

NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R. D.; SECCHI, M.; ABE, M. A. P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção civil. In: 7º Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. **Anais do 7º ENTECA**. Maringá: ENTECA, 2009.

ODA, G. A.; LIBÓRIO, J. B. L. Estudo da adição da sílica ativa da casca do arroz em matrizes de cimentos Portland. In: V Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais, São Carlos, 2002. **Resumos**. São Carlos : CETEPE, 2002.

OLIVEIRA, P.V.; BARBOSA, M.T.G.; DARWISH, F.A. Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore, como agregado miúdo, na confecção de argamassas. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves, RS. **Anais do 49º CBC**. São Paulo : IBRACON, 2007.

OMETTO, A. R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia**. 2005. 209 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2005.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PABLOS, J. M.; SICHERI, E. P. Estudo para a reciclagem do resíduo sólido gerado pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, para a aplicação no setor da construção civil. In: **Reciclagem de resíduos para a construção civil**, FUMEC/ FEA/ E. Chahud (org.), Belo Horizonte : FUMEC, p. 133-167, 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**, Oxford, n. 77, p. 321- 325, 2002.

PHILIPPI Jr, A; AGUIAR, A. O. Resíduos sólidos: características e gerenciamento. In: **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. / Arlindo Philippi Júnior, editor. – Barueri, SP : Manole, 2005.

PINTO, T. P. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil a experiência do SINDUSCON/SP**. Cartilha para Construtoras - Projeto Obra Limpa, SINDUSCON/SP, São Paulo, 2005, 48p.

PRADO, T. G. F. **Externalidades do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia) - POLI/FEA/IEE/IF, Universidade de São Paulo, 2007.

PRÓ-ÁLCOOL. **Programa Brasileiro do Álcool**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm>>. Acesso em: 5 Fev. 2009.

PRUDÊNCIO JR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. de A. Cinza da casca de arroz. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** / Editores Janaíde Cavalcante Rocha [e] Vanderley Moacyr John. - Porto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitare, v.4).

RAJAMANE, N. P.; PETER, J. A.; AMBILY, P. S. Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material. **Cement and Concrete Composites**, Vol. 29, 2007, p. 218-223.

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.



RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; VIEIRA, F. L.; LOPES, A. N. M. Estudo de aglomerantes compostos por cimento Portland comum (CPI) e as cinzas de casca de arroz (CCA) amorfa e cristalina. 2004. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...** Florianópolis, Brasil : IBRACON. CD-ROM.

RELATÓRIO UNICA. **A Energia da Cana-de-Açúcar** – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade / Isaias de C. Macedo (org.); Eduardo P. de Carvalho (apres.). -- São Paulo : Berlendis & Vertecchia : UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005.

REVISTA TÉCNICA. **Concreto sustentável.** / Entrevista com Povindar Kumar Mehta. Técnica, n. 139, outubro 2008, p. 24-27. ISSN 0104-1053. 2008.

REVISTA ABENDE. Setor sucroalcooleiro. / **Revista ABENDE** – Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção, n. 27, agosto 2008. p. 26-31. ISSN 1980-1599.

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, n. 140, Out 2007.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Diesel de cana** - Combustível vai ser produzido por meio de transformações genéticas em leveduras. Edição Impressa, número 153, Novembro 2008.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Cardápio energético.** Edição Impressa, número 157, Março 2009.

RILEM Concrete Permanent Committee. RILEM Draft Recommendation - Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18. **Materials and Structures**, vol. 17, nº 102, 1984, p. 435-440.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** / Eds. J. C. Rocha [e] V. M. John. - Porto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitare, v.4).

RODRIGUES, E. H. V. **Agregados.** / Apostila da disciplina Construções Rurais II, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2005. Disponível em: < [www.ufrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundoo/Agregados.pdf](http://www.ufrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundoo/Agregados.pdf)>. Acesso em: 26 mar. 2009.

ROSSETTO, R. A cultura da cana, da degradação à conservação. **Visão Agrícola**, ESALQ-USP, Ano 1, jan 2004.

ROSSIGNOLO, J. A.; LIMA, S. A.; PABLOS, J. M.; SCHALCH, V. Stabilization/solidification of heavy metals in cashew nut shell ash using Portland cement. In: 12th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies – IC NOCMAT 2010. **Proceedings...** Cairo : Housing & Building National Research Center, 2010.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos.** Dissertação (Mestrado). Departamento Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Paulo, 2008.

SANTOS, W.N.; CINTRA FILHO, J. S. Método de fio quente com ajuste por regressão não linear na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos. **Cerâmica**, v. 32, n. 198, p.151-154, 1986.

SANTOS, W. N. Aplicação da técnica de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros fundidos. **Polímeros** [online]. 2005, vol.15, n.4, pp. 289-295.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza da casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SANTOS, F. I. G., ROCHA, J. C., CHERIAF, M. Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Revista Matéria**. v. 12, n. 2, pp. 253 – 268, 2007.

SANTOS, M. R.; FORMAGINI, S. High performance concrete with addition of ultra fine sugarcane bagasse ashes. IV International aci/canmet conference on high performance concrete structures and materials. **Proceedings**, Manaus, ACI/CANMET, 2008. 13p.

SARKAR, S. L., AIMIN, X., JANA, D. Scanning electron microscopy X-ray microanalysis of concretes. In: Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. (eds), **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology** – Principles, techniques, and applications, New Jersey: Noyes Publications, pp. 231-274, 2001.

SARTORI, M. M. P.; FLORENTINO, H. O. Metodologia e técnicas experimentais: modelos de minimização de biomassa residual. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 3, 297-303, 2002.

SIDDIQUE, R. Effect of Fine Aggregate Replacement With Class F Fly Ash on the Abrasion Resistance of Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1877-1881, 2003.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA G. C. (Ed). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v.1, capítulo 23, p. 761-793.

SILVA FILHO A.F.; MOURA, W.A.; LEITE, R.S. Caracterização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo para produção de concreto. **Revista Sientibus**, n. 26, p. 95-110, 2002.

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

SPADOTTO, C. A. **Gestão de Resíduos**: realizações e desafios no setor sucroalcooleiro. [2007]. EMBRAPA Meio Ambiente. Disponível em: <[http://www.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/360.pdf](http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/360.pdf)>. Acesso em: 08 ago. 2008.

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, RS. **Anais do 49º. CBC**. São Paulo : IBRACON, 2007.

TORRES, A.F. **Dosagem dos concretos** - Boletim nº 1. IPT : São Paulo, 1993.

UNICA. **Setor Sucroenergético** - Mapa da Produção. [2009]. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?>>. Acesso em: 13 Ago. 2009.

VANDERLEI, R.D.; SECCHI, M.; ABE, M.A.P.; AGASSI, J. D. Estudo de dosagens e propriedades mecânicas de concretos utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição mineral. In: II Encontro Nacional sobre Resíduos Sólidos, 2011, Maceió. **Anais do II ENARC**, UFAL : Maceió, AL, 2011.

VILLAIN, G., THIERY, M., PLATRET, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1182–1192, 2007.

WAACK, R. S., NEVES, M. F. Competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar. In: FARINA, E. M. M. Q.; ZYLBERSZTAJN, D. (org). **Competitividade no agrobusiness brasileiro**, São Paulo: PENSA/FEA/USP, 1998. 197 p.

YIN, C. Y; ALI, W. S. W.; LIM, Y. P. Oil palm ash as partial replacement of cement for solidification/stabilization of nickel hydroxide sludge. **Journal of Hazardous Materials**, n. 150, pp. 413–418, 2008.

ZHANG, J.; BISHOP, P. L. Stabilization/solidification (S/S) of mercury-containing wastes using reactivated carbon and Portland cement. **Journal of Hazardous Materials**, nº B92, p. 199–212, 2002.

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 **Produção e análise estrutural de blocos de terra comprimida (BTC) produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

---

No âmbito dos trabalhos do doutorado, pretendeu-se estudar as possibilidades de utilização de CBC (cinza do bagaço de cana-de-açúcar) na construção civil (argamassas, concretos e construções em terra). Para o estudo relativo às aplicações de CBC em Construções em Terra, o trabalho experimental foi desenvolvido no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Portugal, entre os meses de novembro de 2010 e fevereiro de 2011, sob a orientação do prof. Dr. Humberto Varum.

### **1. Objetivos:**

- a) Produzir blocos de BTC com CBC, em teores de 0%, 2%, 4% e 8% de substituição;
- b) Caracterizar mecanicamente os BTCs com CBC por ensaios em compressão simples dos blocos, na idade de 28 dias (NBR 10834, NBR 10835 e NBR 10836);
- c) Analisar o desempenho mecânico dos BTCs confeccionados com a CBC e determinar o melhor teor de substituição.
- d) Analisar os BTCs da etapa (c) por meio de ensaios de durabilidade: Ensaio de permeabilidade/ absorção (NBR 10836);
- e) Construir e analisar mecanicamente mini-paredes com os BTCs da etapa (c) - (estas mini-paredes serão construídas em função da disponibilidade de tempo e recursos, os quais serão definidos ao longo da experimentação);
- f) Comparar os resultados obtidos nos ensaios com os blocos e as mini-paredes;
- g) Escrever e submeter artigos para publicação em Journals e Congressos.

### **2. Metodologia**

Apresenta-se a seguir a descrição das etapas da metodologia desenvolvida a fim de que se chegasse aos objetivos propostos.

## 2.1. Materiais

Para a produção dos blocos, utilizou-se solo arenoso proveniente da região de Aveiro, Portugal. Antes de ser misturado com os demais materiais, o solo passou por um processo de separação de eventuais resíduos orgânicos e quaisquer outros detritos existentes, e de uniformização da granulometria, através da utilização de uma peneira n° 4 (#4,8 mm), de acordo com as recomendações da norma NBR 10832.

Uma vez que o solo apresentou uma fração de areia grossa muito elevada (acima de 70%), optou-se por corrigir a granulometria com uma argila, o caulino, que foi escolhida pela disponibilidade na região. Após algumas análises em relação à moldagem e compactação do BTC, escolheu-se a proporção de uma parte de caulino para sete partes de solo (1:7).

A mineralogia e a composição química do caulino está estreitamente relacionada com a granulometria. O caulino usado nesta pesquisa atendeu aos requisitos da indústria cerâmica, os quais especificam que o caulino lavado de primeira qualidade deve possuir: i) cor branca após queima a 1400° C; ii) teor de  $Al_2O_3 > 36\%$  ( $> 34\%$  para caulino de segunda qualidade); iii) teor de  $TiO_2 < 1,1\%$  ( $< 1,5\%$  para caulino de segunda qualidade). Em relação às propriedades físicas, o caulino apresentou massa unitária no valor de  $570 \text{ kg/m}^3$  e massa específica no valor de  $2412 \text{ kg/m}^3$ . A análise da composição química, obtida por espectrometria de fluorescência de raios-X dos solos, encontra-se na Tabela 1.

**Tabela 1**

Análise química dos solos utilizados na pesquisa

Elementos (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF	Total
Solo de Aveiro	91,18	4,28	0,21	< 0,01	1,37	0,06	< 0,01	< 0,01	0,03	2,53	99,68
Caulino	48,33	36,63	1,99	0,04	0,87	0,06	0,32	< 0,01	0,12	12,14	100,57

O ensaio de limite de plasticidade e de liquidez do solo não foi necessário neste caso porque, segundo a norma NP-143, esse ensaio é aplicável apenas para solos com fração argilosa maior que 30%, o que não se aplica ao solo utilizado nesta pesquisa, cuja análise granulométrica encontra-se na Tabela 2.

**Tabela 2**

Composição granulométrica do solo usado na produção dos BTCs

Solo - Amostra #1			Solo - Amostra #2		
Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado
4,76	0,00	0,00	4,76	0,06	0,06
2,00	14,70	14,70	2,00	20,14	20,20
0,85	55,51	70,21	0,85	60,17	80,37
0,425	16,23	86,44	0,425	13,00	93,37
0,250	5,88	92,32	0,250	3,00	96,37
0,106	5,22	97,54	0,106	2,09	98,46
0,075	1,08	98,62	0,075	0,48	98,94
Fundo	1,36	99,98	Fundo	1,05	99,99
Total	99,98		Total	99,99	
Argila + Silte		1,4%	Argila + Silte		1,1%
Areia	Fina	6,3%	Areia	Fina	2,6%
	Média	5,9%		Média	3,0%
83,9%	Grossa	71,7%	78,7%	Grossa	73,2%
Cascalho		14,7%	Cascalho		20,2%

O aglomerante utilizado como estabilizante do solo foi o Cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N, da CIMPOR - Indústria de Cimentos, S.A. A composição química desse cimento encontra-se na Tabela 3.

**Tabela 3**

Características do cimento CEM II/B-L utilizado nos blocos. Fonte: Fabricante.

Composição química	
Substância	Teor no cimento, em massa (%)
Clínquer de cimento Portland	45-100
Calcário	0-35
Cinzas volantes	0-55
Massa específica	2750-3200 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária	900-1500 kg/m <sup>3</sup>
Dimensão média das partículas	5-30 µm

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) foi utilizada em adição à massa total de solo+cimento. As amostras de CBC foram coletadas em usinas do Estado de São Paulo, Brasil, próximas à cidade de São Carlos, SP, Brasil. A cinza foi submetida ao peneiramento (#4,8 mm) e à moagem por 3 minutos em moinho tipo almofariz-pistilo.

A caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizada apresentou como resultados: massa específica, no valor de 2650 kg/m<sup>3</sup>; massa unitária, no valor de 1390 kg/m<sup>3</sup>; dimensão máxima característica no valor de 0,60 mm e módulo de finura no valor de 1,23.

## 2.2. Produção e caracterização dos BTCs

Para as análises dos blocos foram produzidos duas séries, com 6% e com 12% de cimento em adição ao solo, com teores de adição de CBC nos valores de 0%, 2%, 4% e 8%. A quantidade de água foi ajustada para cada série e aumentou à medida que se aumentou a quantidade de CBC na mistura, para uma mesma consistência de amassamento e moldagem. A Tabela 5 apresenta a quantidade de material utilizado em cada série de blocos.

**Tabela 5**

Materiais utilizados na preparação dos blocos de terra comprimida

Série	Teor de cimento (em massa)	Proporção dos materiais - % (em massa)			Teor de água (%)
		Solo	Cimento	CBC	
CP6-C0	6% CP	1,00	0,06	-	10,85
CP6-C2		1,00	0,06	0,02	10,88
CP6-C4		1,00	0,06	0,04	11,36
CP6-C8		1,00	0,06	0,08	11,40
CP12-C0	12% CP	1,00	0,12	-	12,72
CP12-C2		1,00	0,12	0,02	12,81
CP12-C4		1,00	0,12	0,04	12,84
CP12-C8		1,00	0,12	0,08	13,33

A mistura dos materiais para a produção dos blocos foi realizada em betoneira portátil com capacidade para 80 litros, a qual permitiu produzir o volume de mistura equivalente a doze blocos de solo-cimento por vez. Com o uso da betoneira, foram tomados alguns cuidados para se obter misturas homogêneas. Buson et al. (2010) atestaram que se a mistura fica girando por um tempo um pouco maior que o tempo necessário para a homogeneização do compósito, esta começa a apresentar “grumos”, ou pequenas bolas normalmente constituídas de um só material. Quanto maior a ocorrência dos grumos numa mistura menos homogênea ela resultará.

A moldagem dos blocos foi realizada em uma prensa manual do tipo TERSTARAM, da Appro-Techno. Essa prensa produz dois blocos por vez, não possui compartimento para

depósito da mistura, nem sistema para colocação de material dentro dos moldes de compactação. Após a moldagem, os blocos foram dispostos em local com ventilação controlada e sem incidência direta do sol, até a data de ensaio [Figura 1].



**Fig. 1.** Secagem dos blocos após a moldagem

O ensaio de resistência à compressão e de absorção dos tijolos foram executados segundo as recomendações das normas brasileiras NBR 8491 e NBR 8492, com algumas adaptações.

Em relação ao ensaio de resistência à compressão, algumas mudanças foram adotadas em relação às normas. A primeira foi em relação à submersão dos blocos em água antes da ruptura, na qual adotou-se a mesma metodologia de Buson et al. (2010). E em segundo lugar, em relação ao número de exemplares submetidos ao ensaio. Foram ensaiados três blocos em cada série, e não dez, como a norma determina.

Após o tempo de cura de 28 dias, os blocos foram cortados ao meio e unidos com uma pasta de cimento. Após 48 horas de secagem da pasta, a superfície dos blocos foi nivelada com uma pasta de solo fresca para melhorar o ajuste e regularização nos pratos da prensa [Figura 2].





**Fig. 2.** Ensaio de resistência à compressão dos blocos

As normas brasileiras propõe um método semelhante ao proposto pelo Comitê Técnico 164 (RILEM), no qual as duas metades de um bloco são testadas em conjunto com uma argamassa de ligação, formando um pequeno prisma. Os resultados tem demonstrado que o desempenho desse tipo de ensaio não depende muito da geometria dos blocos, além de se basear bastante no desempenho da argamassa e da qualidade na preparação dos prismas.

Em relação ao ensaio de absorção, tendo em vista que a NBR 10832 prevê que os blocos tenham que ser utilizados com uma idade mínima de 14 dias, a aferição da absorção foi feita com tal idade.

Duas amostras de BTCs (com 0% e 8% de CBC) foram caracterizadas por meio de imagens de microscópio ótico (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). O primeiro ensaio permite a distinção dos minerais que compõe o solo usado na produção dos blocos devido a coloração diferenciada. O segundo ensaio foi realizado para analisar a hidratação do cimento e a sua interação com os materiais usados nos blocos: argila, solo e CBC. Para a obtenção das amostras, pequenos pedaços de cada bloco foram moídos e dissolvidos em etanol.

A análise pelo microscópio ótico foi realizada em um equipamento Nikon Eclipse LV150 equipado com sistema de aquisição e técnica de iluminação claro-escuro. A análise de MEV foi realizada em um equipamento Hitachi S-4100.

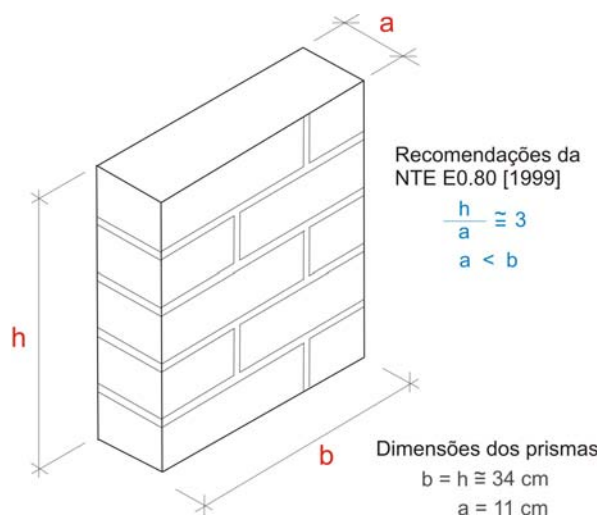
### 2.3. Produção e caracterização mecânica dos prismas

Neste item, serão apresentados os materiais utilizados nos ensaios e as técnicas aplicadas para a análise dos blocos e dos prismas produzidos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Após o término dos ensaios de caracterização e a definição do melhor teor de CBC a ser adicionado aos BTCs, duas séries de prismas de alvenaria, incluindo uma delas sem CBC, foram produzidas e analisadas em relação a resistência à compressão axial e diagonal, aos 28 dias. Foram utilizadas como referências a norma peruana para construções em adobe, a NTE E0.80, e as notas técnicas TC76-LUMB1 e TC76-LUMB6, da RILEM.

Segundo a NTE E0.80, a resistência à compressão da alvenaria pode ser determinada por ensaios com paredes reduzidas (prismas) compostas por número de fiadas suficiente para se obter um coeficiente de esbeltez (relação altura/espessura) da ordem de aproximadamente 3, sendo 4 o número mínimo de fiadas. O tempo de cura dos prismas é de 30 dias e o número mínimo a ser ensaiado é de três amostras.

O desenho esquemático dos prismas encontra-se na Figura 4. A TC76-LUMB1 recomenda que o coeficiente de esbeltez do prisma fique entre 3 e 5 e que o número de fiadas seja de 5, no mínimo. Também descreve que o número mínimo de blocos deve ser de 3 e acrescenta que a relação entre a altura e o comprimento da parede deve ser maior ou igual a 1.



**Fig. 4.** Esquema dimensional dos prismas

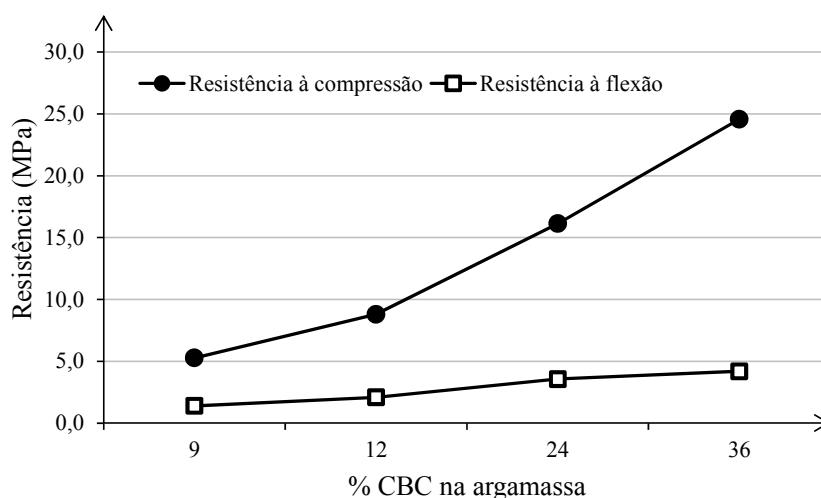
Dessa forma, levando-se em conta essas prescrições, as dimensões dos primas foram: 34,0 cm de largura (1 ½ bloco) x 34,0 cm de altura x 11 cm de largura, aproximadamente. A variação dessas medidas ficou em  $\pm 1$  cm, devido a variação da altura dos blocos.

Para cada série de blocos (com ou sem CBC) foram produzidos seis prismas, três para o ensaio axial e os demais para o ensaio diagonal. Os blocos foram assentados com argamassas de solo-cimento com 9% de CBC e as espessuras das fiadas em aproximadamente 10 mm, na horizontal, e de 15 mm, na vertical [Figura 5].



**Fig. 5.** Produção dos prismas (esquerda); e período de cura, com ventilação e temperatura controladas (direita).

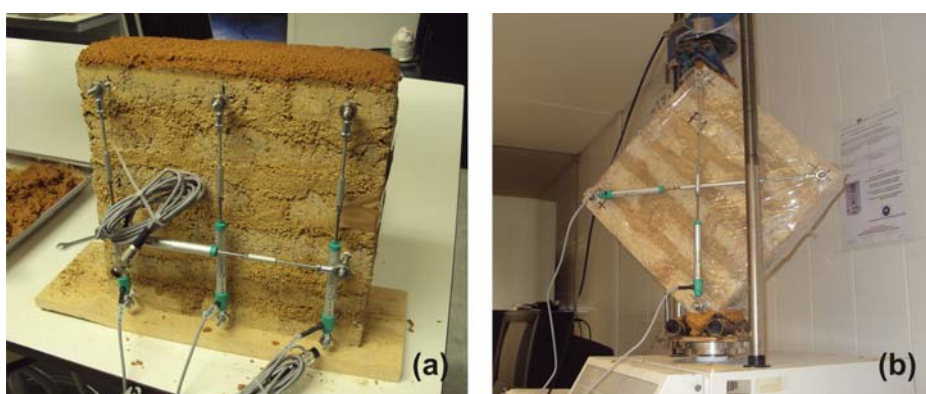
O teor de cimento a ser utilizado na argamassa de assentamento foi determinado por meio de ensaios de resistência à compressão e à tração, em misturas com 9%, 12%, 24% e 36% de cimento em relação ao solo. O teor de 9% foi escolhido por que a resistência dessa argamassa, aos 28 dias, foi a mais próxima da resistência dos blocos [Figura 6].



**Fig. 6.** Resistência à compressão e à flexão das argamassas de assentamento testadas para uso nos prismas

Os ensaio de compressão axial foi realizado com uma célula de carga de 100 kN em conjunto com um sistema de apoio fixo. E o ensaio diagonal foi realizado em uma prensa digital, marca ELE, modelo Multiplex 50-E.

Para a medição das deformações ocorridas durante os ensaios dos prismas foi desenvolvido um sistema de fixação e apoio para colocação de extensômetros por meio de chumbadores do tipo *parabolt*. Este dispositivo permitiu que uma barra, de seção circular, de alumínio fosse apoiada em dois pontos. Nesta barra, fixou-se um extensômetro e a medição das deformações foi feita utilizando-se como base o topo de um dos chumbadores. Optou-se pela colocação de três barras na vertical, para medir as deformações paralelas, e mais uma barra horizontal. Com estas três barras foi possível verificar se os carregamentos ocorreram de forma uniforme [Figura 7a].



**Fig. 7.** Extensômetros adaptados para uso nos prismas: Análise de resistência à compressão axial (a) e Análise de resistência à compressão diagonal (b)

No ensaio diagonal, foram dispostas duas barras, uma vertical e outra horizontal, para medir a deformação nos dois sentidos. O ensaio foi realizado submetendo um painel quadrado de alvenaria a uma força de compressão aplicada em dois cantos opostos ao longo de uma diagonal até a ruptura do mesmo. A força cortante pode ser deduzida da força de compressão diagonal baseando-se em uma distribuição teórica de tensões normais e de corte para uma quantidade contínua, homogênea e elástica de material [Figura 7b].

Para favorecer a transmissão e distribuição uniforme do carregamento através das chapas metálicas, e também diminuir a interferência de pequenas irregularidades nas faces dos prismas, utilizou-se uma fina camada de argamassa fresca com a mesma composição da argamassa de assentamento. As chapas eram dispostas no local antes da argamassa perder sua

consistência plástica, ou melhor, antes dos prismas absorverem a água da argamassa. No ensaio diagonal, para a colocação e o alinhamento dos prismas no equipamento de compressão foram utilizados dois apoios metálicos com cantoneiras. Para melhor distribuição dos carregamentos também optou-se pela utilização de uma fina camada de argamassa nas cantoneiras com a mesma composição da argamassa de assentamento.

Durante o ensaio diagonal, os prismas foram envoltos com uma camada de plástico filme transparente com o objetivo de evitar o colapso da peça no momento da ruptura. O plástico filme não exerceu qualquer forma de sustentação da estrutura, servindo apenas para a segurança dos operadores da prensa durante os ensaios.

### 3. Análise dos resultados

#### 3.1. Blocos de terra comprimida

Neste item, serão analisados e discutidos os resultados dos testes de compressão axial, absorção e análise da microscopia eletrônica das séries de BTCs com 0% e 8% de CBC.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos blocos encontram-se na Tabela 6. Na série produzida com 6% de cimento, o aumento de adição de CBC resultou no aumento da resistência máxima à compressão dos blocos em até 54%, mas os valores médios da série não ultrapassaram o valor de 1,54 MPa, aos 28 dias. Apenas os blocos feitos com 12% de cimento obtiveram valores acima dos 2,00 MPa.

**Tabela 6**

Resultados do ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias.

Séries	Resistência à compressão (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
CP6-C0	0,70	0,08	11,16
CP6-C2	0,92	0,19	20,67
CP6-C4	1,44	0,15	10,36
CP6-C8	1,54	0,16	10,16
CP12-C0	3,13	0,21	6,63
CP12-C2	2,77	0,11	3,81
CP12-C4	2,62	0,10	3,72
CP12-C8	2,89	0,11	3,81

Para a série com 12% de cimento, os blocos de referência (CP12-C0) atingiram o valor médio de 3,13 MPa, aos 28 dias, enquanto que os blocos com 8% de CBC chegaram a 2,89 MPa. O coeficiente de variação foi bem menor nos blocos com 12% de cimento. Esse fato pode ser explicado pela maior quantidade de partículas finas dispersas na mistura, o que pode ter resultado em blocos mais homogêneos, e conseqüentemente, mais densos e resistentes.

Todos os valores de resistência à compressão médios da série com 12% de cimento ficaram acima do valor mínimo estipulado pela normalização brasileira, podendo-se destacar a série produzida com 8% de CBC, em massa. Para essa série (CP12-C8), analisou-se se a sua média poderia ser considerada estatisticamente igual ao valor médio de referência (3,13 MPa). Então um teste *t-Student* foi aplicado e determinou que não há subsídios suficientes para rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores médios obtidos, podendo-se concluir, neste ensaio, que a adição de CBC em 8% não influenciou a resistência à compressão dos BTCs.

Em relação ao ensaio de absorção, os valores para os tijolos de solo-cimento podem chegar até 20%, em média, a partir de sete dias. Os resultados obtidos indicam que o aumento do teor de CBC proporciona um incremento na massa específica no estado seco dos blocos em até 6%, mas que os valores de absorção continuaram bastante próximos, em torno de 12% para todas as amostras [Tabela 7].

**Tabela 7**

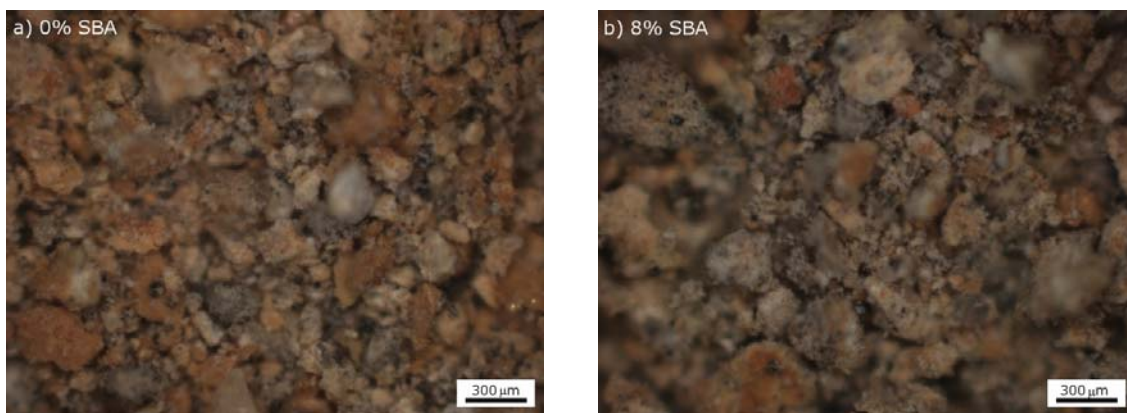
Resultados do ensaio de absorção, aos 14 dias.

Série	Absorção (%)	Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )
CP6-C0	12,41	1930
CP6-C2	12,61	1950
CP6-C4	13,79	1980
CP6-C8	11,86	2020
CP12-C0	11,94	2020
CP12-C2	12,20	2010
CP12-C4	11,57	2030
CP12-C8	12,11	2040

A série produzida com 12% de cimento Portland e 8% de CBC, em massa, apresentou um valor superior ao mínimo recomendado pela normalização brasileira para este tipo de componente. O valor obtido para esta série é um pouco inferior ao valor do exemplar de

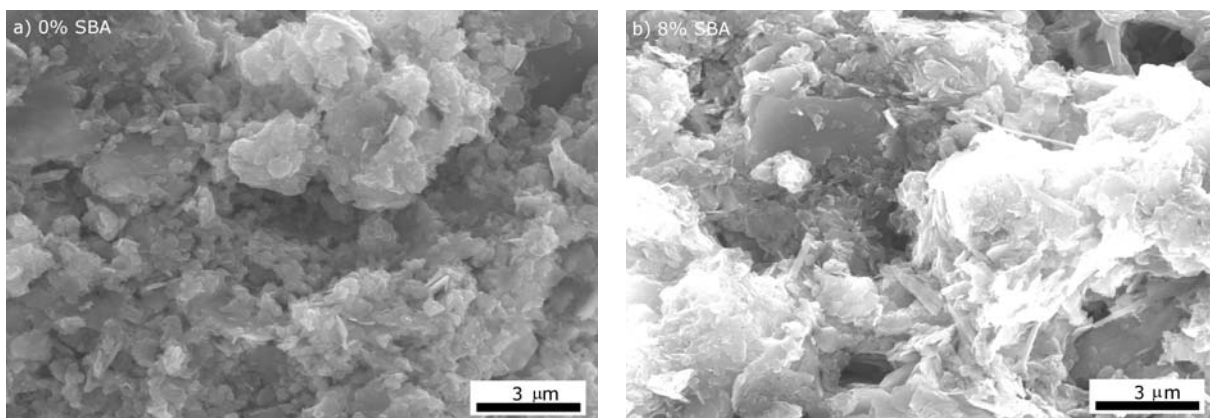
referência, mas considerando o nível de absorção de água obtido, os resultados destas propriedades validam o uso da CBC para a produção de blocos em terra comprimida.

A Figura 8 apresenta as imagens do microscópio óptico das amostras analisadas (BTC com 0% e 8% de CBC). Essas imagens foram adquiridas por meio da técnica de campo escuro da iluminação. Embora as imagens não sejam completamente claras, devido a diferentes planícies de focagem (alguns grãos aparecem de forma manchada), é possível identificar claramente quartzo, mica, mas também, calcário e feldspato, alguns dos constituintes do solo utilizado.



**Fig. 8.** Imagens do campo escuro – microscópio óptico; a) amostra sem CBC; b) amostra com 8% de CBC.

As partículas de areia variaram em diâmetro de 0,3 mm até partículas com apenas alguns micrômetros. Comparando imagens do microscópio óptico das amostras com 0% e 8% de adição de CBC (Figuras 8a e 8b, respectivamente), não se observa nenhuma diferença entre as amostras. A Figura 9 apresenta as imagens de MEV das amostras com 0% e 8% de CBC. Por essas imagens, novamente, não são detectadas diferenças entre as amostras.

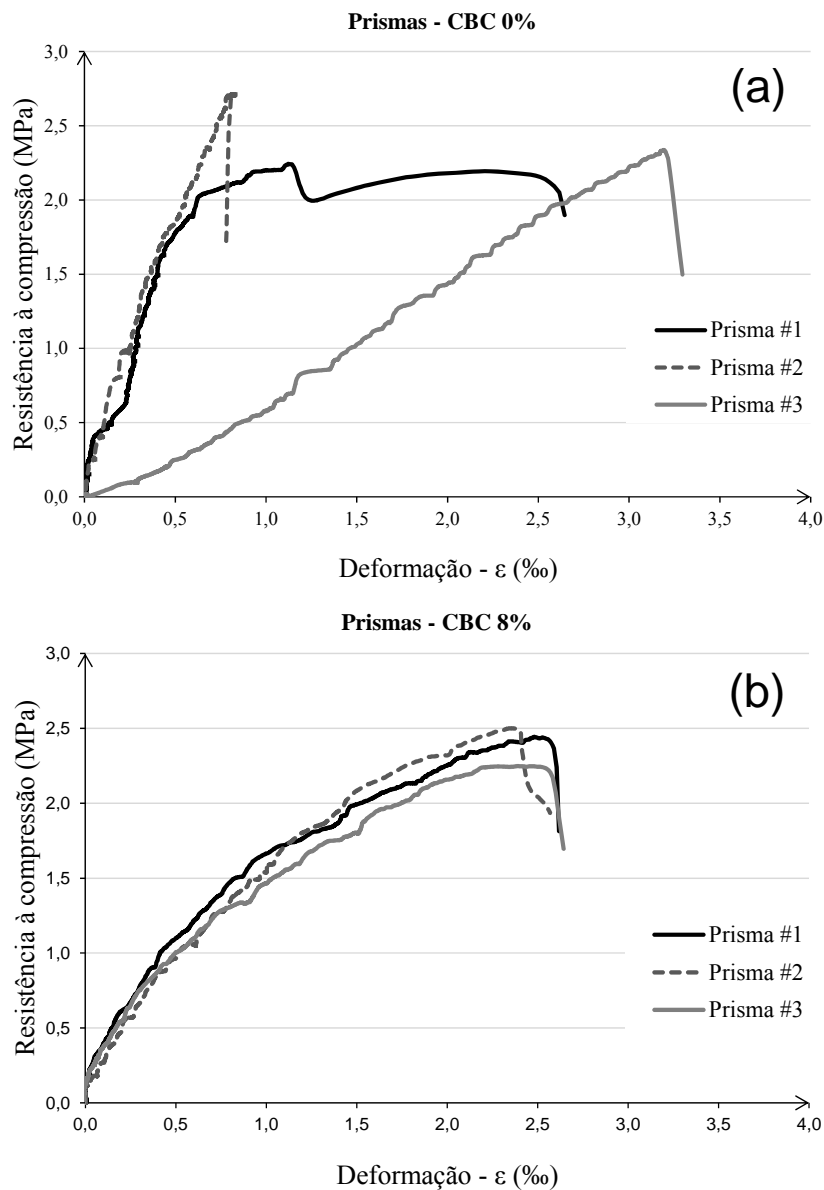


**Fig.9.** Imagens de MEV: a) amostra sem CBC; b) amostra com CBC.

Nas amostras com 8% de CBC há alguns traços de cana-de-açúcar moída carbonizada, mas em pouca quantidade. Ambas imagens apresentam uma distribuição muito homogênea dos componentes (argila, solo e CBC) e uma boa ligação desses componentes entre si.

### 3.2. Caracterização mecânica dos prismas

A Figura 10 mostra a o comportamento dos prismas no ensaio de compressão axial. Observa-se que os três prismas feitos com 8% de CBC tiveram um comportamento semelhante e que os prismas de referência (CBC 0%) tiveram comportamento bem distintos entre si.



**Fig.10.** Resistência à compressão versus deformação dos prismas: a) Prismas com 0% CBC e b) Prismas com 8% CBC



Entre os prismas de referência, o prisma #2 obteve ruptura do tipo frágil, enquanto os prismas feitos com a CBC se mostraram mais dúcteis, em média, do que os exemplares de referência. Isso mostra que a incorporação de cinza melhorou o comportamento elástico dos BTCs.

Em relação à tensão de ruptura, os primas de referência obtiveram uma tensão média de cisalhamento no valor de 2,42 MPa, enquanto nos primas com CBC a média ficou em 2,36 MPa, valores bem próximos daqueles obtidos pelos BTCs. Foi realizado um teste *t-Student* para inferir sobre duas amostras pequenas e independentes. Nesse caso, as variâncias deveriam ser próximas entre as amostras, o que foi confirmado por um teste *F*. O teste *t-Student* determinou que não há subsídios suficientes para rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores médios, o que pode ser um dos indícios de que a incorporação da CBC não influenciou na resistência à compressão média de alvenarias feitas com os BTCs.

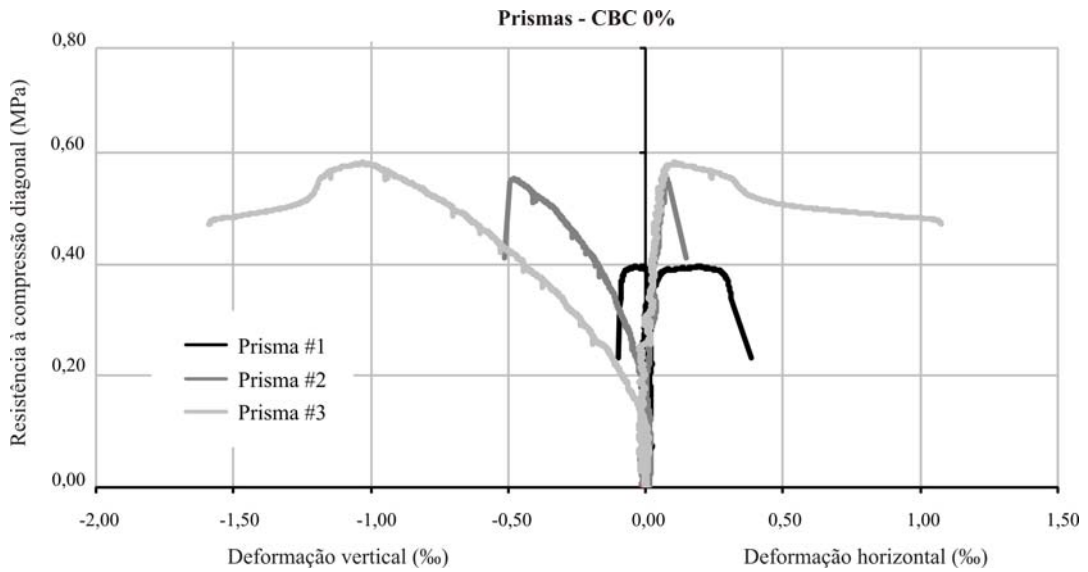
O coeficiente de variação (CV) ficou em 10,63% para os prismas de referência e 4,60% para os prismas com CBC, o que, novamente, comprovou a melhor homogeneidade dos BTCs feitos com a cinza. Esses valores de CV são compatíveis com a TC76-LUMB1, que estipula que o número mínimo de prismas ensaiados tenha que ser aumentado até 10 amostras caso o CV fique acima de 20%. A Tabela 8 apresenta os dados detalhados relativos ao ensaio de compressão axial dos prismas.

**Table 8**  
Resultado de resistência à compressão dos prismas

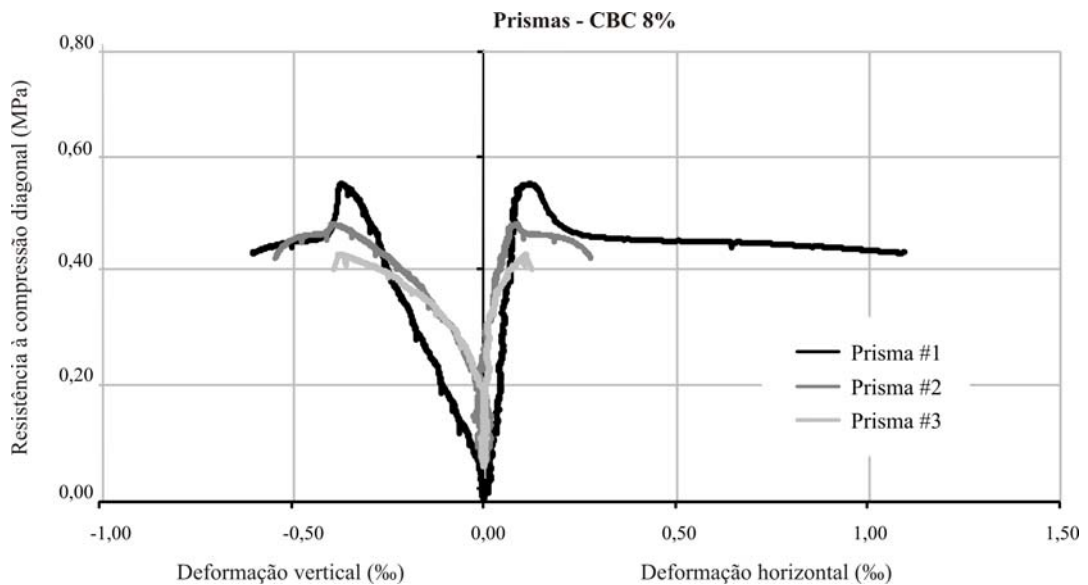
Grupo		Dimensões – h x l x e (mm)	Relação altura/ espessura (> 3)	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Coefficiente de variação (%)
CBC 0%	1	345x345x110	3,14	2,24	2,42	10,63
	2	348x345x110	3,16	2,71		
	3	340x345x110	3,09	2,30		
CBC 8%	1	360x345x110	3,27	2,24	2,36	4,60
	2	350x345x110	3,18	2,44		
	3	350x345x110	3,18	2,41		

As distribuições das fissuras pelos prismas indicaram que as rupturas ocorreram por esmagamento em todos os casos e que o carregamento foi distribuído de maneira uniforme. Não foram registradas fissuras do tipo corte (cisalhamento), o que poderia denotar um apoio deficiente do prisma no aparelho de teste ou defeitos de execução dos prismas, como a falta de verticalidade.

As Figuras 11-12 apresentam os resultados do ensaio diagonal dos prismas. Apesar de os valores referentes à tensão máxima alcançada pelos dois grupos (CBC0% e CBC8%) terem ficado bem próximos, nota-se uma maior deformação horizontal e vertical dos prismas pertencentes ao grupo de referência. Além disso, os três prismas feitos com 8% de CBC demonstraram um comportamento semelhante entre si, da mesma forma que ocorreu no ensaio de compressão axial com os prismas do mesmo grupo [Fig. 10].



**Fig.11.** Deformação vertical e horizontal versus resistência à compressão diagonal dos prismas sem CBC



**Fig.12.** Deformação vertical e horizontal versus resistência à compressão diagonal dos prismas com CBC

Todos os prismas apresentaram as trincas de ruptura muito próximas da linha normal de carregamento, com ruptura do tipo frágil. As fissuras ocorreram, na sua maior parte, entre a argamassa e o bloco. A pouca aderência argamassa-bloco pode ser devido ao fato do solo utilizado na argamassa não ser adequado, uma vez que possui uma fração de areia grossa muito elevada (acima de 70%). Porém, optou-se por usar esse solo na argamassa de assentamento por ser o mesmo utilizado na produção dos BTCs.

A Tabela 9 apresenta os dados relativos ao ensaio de compressão diagonal dos prismas. Em relação à tensão de ruptura, os primas de referência obtiveram uma tensão de ruptura diagonal no valor de 0,34 MPa, enquanto nos primas com CBC a média ficou em 0,33 MPa.

**Tabela 9**  
Resultados do ensaio de compressão diagonal dos prismas

Amostra	Dimensões – h x l x e (mm)	Relação altura/ espessura (>3)	Resistência ao corte (MPa)	Média (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Módulo de cisalhamento - G (GPa)
CBC 0%	1 345 x 345 x 110	3,14	0,27	0,34	19,23	1202,83
	2 330 x 345 x 110	3,00	0,37			595,21
	3 340 x 345 x 110	3,09	0,38			312,45
CBC 8%	1 357 x 345 x 110	3,20	0,39	0,33	15,97	786,78
	2 353 x 345 x 110	3,21	0,32			669,48
	3 345 x 342 x 110	3,14	0,28			582,82

No ensaio de ruptura diagonal também foi aplicado um teste *t-Student* que determinou que não há subsídios suficientes para rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores médios. Apesar da igualdade estatística, o CV do grupo sem a cinza foi um pouco maior (19,23%) do que o grupo de prismas feito com a cinza (15,97%), o que reforça o fato de que tanto os BTCs quanto os prismas feitos com a CBC apresentaram uma maior homogeneidade estrutural.

## 6. Conclusões

Os resultados obtidos permitem concluir que:

- A resistência à compressão das amostras com 12% de cimento foram satisfatórias e atenderam aos valores estipulados pela normalização brasileira;

- A adição de CBC não afetou a resistência mecânica e a absorção de água dos blocos de terra comprimida produzidos com solo e cimento, e este resíduo pode ser incorporado a esse tipo de componente;
- A série produzida com 12% de cimento Portland e 8% de CBC, em massa, pode ser utilizada na fabricação de componentes de alvenaria não-estrutural.
- Os prismas produzidos com a CBC apresentaram melhor comportamento estrutural, nos ensaios de resistência à compressão axial e diagonal, do que os prismas de referência, produzidos sem cinza.
- Os valores médios observados nos ensaios de resistência mecânica dos prismas, com e sem CBC, ficaram muito próximos entre si. Apesar dos valores de referência terem ficado um pouco acima, estatisticamente não podem ser considerados diferentes.

## Referências

PIATTONI Q, QUAGLIARINI Q, LENCI S. Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks, *Const Building Materials* 25 2011:2067-75.

MOREL J, PKLA A, WALKER P. Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Const Building Materials* 21 2007; 303–9.

BUSON MA, VARUM H, SPOSTO RM. Viability analysis of using cellulose pulp recycled from cement sacks in the production of compressed earth blocks. 37th IAHS World Congress on Housing Science: Design, technology, refurbishment and management of buildings; Santander, Spain, 2010.

BARBOSA, NP. Transferência e aperfeiçoamento da tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua em comunidades carentes. *Coletânea Habitare*, v.2, ANTAC. Porto Alegre, Brasil. 2003, p.12-39.

BASHA EA, HASHIM R, MAHMUD HB, MUNTOHAR AS. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Const Building Materials*, 19 2005: 448–53.

SHON C-S, SAYLAK D, ZOLLINGER DG. Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in manufacturing compressed earth bricks. *Const Building Materials* 23 2009:2062–71.

ABNT. NBR 10832 – Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa manual. Rio de Janeiro, 1989.

GEOMUSEU. Classificação e Tipos de Argilas. Available at: <<http://geomuseu.ist.utl.pt>>.

NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. São Paulo, 2002.

NP 83. Solos. Determinação da densidade das partículas. Norma Portuguesa Definitiva, 1965.

NP 143. Solos. Determinação dos limites de consistência. Norma Portuguesa Definitiva, 1969.

ABNT - NBR 8491 – Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - NBR 8492 – Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984.

NTE E.080. Adobe: Reglamento Nacional de Construcciones. Lima, Peru, 2000.

RILEM. LUMB1 - Compressive strength of small walls and prisms. Technical Report, RILEM; 1994.

RILEM. LUMB6 - Diagonal tensile strength tests of small wall specimens. Technical Report, RILEM; 1994.