

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
- PPGE**

EVERLEI CÂMARA

**EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS
MIÚDOS POR CINZAS RESIDUAIS DO BAGAÇO DA CANA-
DE-AÇÚCAR NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO
CIMENTO**

**Florianópolis
2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
– PPGEC**

EVERLEI CÂMARA

**EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS
MIÚDOS POR CINZAS RESIDUAIS DO BAGAÇO DA CANA-
DE-AÇÚCAR NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO
CIMENTO**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a

**Florianópolis
2015**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

CÂMARA, EVERLEI

EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS MIÚDOS POR
CINZAS RESIDUAIS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PROCESSO DE
HIDRATAÇÃO DO CIMENTO / EVERLEI CÂMARA ; orientadora,
Janaíde Cavalcante Rocha - Florianópolis, SC, 2015.

186 P.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Cinza do bagaço da cana-de
açúcar. 3. ultrassom. 4. sustentabilidade. I. Cavalcante
Rocha, Janaíde . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

**EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS
MIÚDOS POR CINZAS RESIDUAIS DO BAGAÇO DA CANA-
DE-AÇÚCAR NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO
CIMENTO**

EVERLEI CÂMARA

Tese julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em
Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de
Santa Catarina – UFSC.

Florianópolis, 30 de Setembro de 2015

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador - PPGEC

Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a - ECV/UFSC
Orientadora

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D - ECV/UFSC
Coorientador

Prof. Almir Sales, Dr.
UFSCar

Prof. Daniel Veras Ribeiro, Ph.D
UFBA

Prof. Ivo José Padaratz, Dr.
ECV/UFSC

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr., Ph.D
ECV/UFSC

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.
ECV/UFSC

AGRADECIMENTOS

Aos Professores, Janaíde Cavalcante Rocha e Roberto C. A. Pinto, pelas orientações dispensadas, pela compreensão e permanente disponibilidade no transcorrer do desenvolvimento desta tese.

Ao meu pai, Romeu Rodrigues Câmara, e irmãos, Rita, Everaldo, Roseli e Juliano, pelo carinho, apoio, dedicação e confiança.

Ao meu filho, Vinícius Câmara, pelo desprendimento por ter um pai ocupado no decorrer do desenvolvimento deste doutorado e pelo carinho e amor gratuito.

Especialmente ao meu companheiro de todos os momentos, César Augusto Hoffmann, por todo apoio, carinho, compreensão, dedicação e paciência.

Aos meus amigos, Professor Igo e esposa Maria, Professor Patrik e esposa Professora Elise, pelos momentos de lazer, descontração e apoio proporcionados nos momentos mais difíceis.

Aos bolsistas de iniciação científica da UNIPAR, Luana, Maísa, Ana, Alexandre, João, Douglas e Lucas, pela incansável colaboração durante a fase experimental e pela amizade formada.

Ao mestrando da UEM e egresso da UNIPAR, Yuri Danilo Lopes, pela incansável colaboração durante a fase experimental e pela amizade formada.

À UNIPAR, pela oportunidade concedida, especialmente ao Diretor de Campus, Professor Nílvio e Diretora de Instituto, Professora Giani, pela compreensão e apoio nos momentos em que mais precisei.

Aos colegas de trabalho na UNIPAR, professores e funcionários, em especial ao Igo, Patrik, Arnaldo, Marcelo, Nelci, Felipe e Otávio, por toda ajuda despendida e compressão durante minhas ausências para realização de atividades relativas ao doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, ao Laboratório de Experimentação em Estruturas, ao Laboratório de Materiais de Construção, ao Laboratório VALORES e aos técnicos de laboratório.

Aos colegas e amigos do GPEND e VALORES, pela ajuda concedida e amizade formada.

RESUMO

O bagaço da cana-de açúcar é um subproduto da indústria sucroalcooleira que vem sendo utilizado para geração de energia elétrica na própria indústria a partir de sua queima. A areia de cinza de bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) gerada é um material rico em sílica, passível de ser utilizado em misturas de concreto e/ou argamassa. Devido à sua granulometria, uma possível utilização se dá pela substituição parcial do agregado miúdo, o que possibilita a contribuição na redução do impacto ambiental causado pela extração de areia em suas jazidas e leitos de rios, somando ao potencial de diminuição de emissões de CO₂ e de despejos de resíduos nas lavouras ou locais inapropriados. Na presente pesquisa buscou-se avaliar misturas de concretos e argamassas com adição de CBC, com três diferentes tratamentos, em substituição parcial dos agregados miúdos. Os tratamentos foram: moagem curta (moagem de 10 minutos em moinho de bolas para homogeneização da areia de cinza); moagem longa (3 horas de moagem em moinho de bolas para aumentar a quantidade de finos da areia de cinza); e requeima (em forno mufla por 3 horas a 300°C mais 3 horas a 600°C para diminuição de materiais orgânicos presentes na areia de cinza). Realizou-se o monitoramento do processo de endurecimento nas misturas com ACBC e sem ACBC (misturas de referência), fazendo leituras com diferentes métodos, inclusive com o de leituras de velocidade dos pulsos ultrassônicos, que se mostra vantajoso não só para monitoramento de propriedades do concreto endurecido, mas também para monitoramento de características de argamassas e concretos frescos. Os resultados obtidos neste estudo, junto com análises físico-químicas, definem a ACBC com provável propriedade pozolânica e de efeito filer para misturas cimentícias.

Palavras-chave: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar; ultrassom; sustentabilidade.

ABSTRACT

Sugarcane bagasse is a byproduct of sugar and ethanol industry which has been used when burnt to energy generation for industry needs. Generated Sugarcane bagasse ash (SBA) consists in material silica-based, liable of use in concrete and or mortar mixture. Due its granulometry, a possible use is in the partial replacement of small aggregates, turning possible to contribute in the minimization of environmental impact caused by the sand extraction in deposit or river bed, adding to its potential in diminishing CO₂ emission and inappropriate waste disposal in crops or improper places. In this work we aimed to evaluate mixtures of concrete and mortar with SBA addition, with three different treatments, in partial replacement of small aggregates. The treatments were: short term grinding (for 10 minutes in balls grinding machine in order to homogenize ashes); long term grinding (3 hours in balls grinding machine in order to improve the amount of fine ashes); and re-burning (muffle oven for 3 hours at a temperature of 300 °C, and over 3 hours more at 600 °C to reduce organic matter in ash). Hardening process of the with and without SBA (reference mixture) was supervised through the perusal of different methods, including the measurement of ultrasonic pulse velocity, which seems to be profitable not only for monitoring concrete hardening process, but also for monitoring mortar and the fresh concrete characteristics. Results obtained, with physic – chemical analysis, defined SBA with probable pozzolanic property and with filler effects for cementitious mixtures.

Keywords: Sugarcane bagasse ash; ultrasound; sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição do tamanho das partículas das diferentes frações do cimento Portland (ZHANG et al., 2011).....	38
Figura 2.2 – Plantações de cana-de-açúcar nas fases de crescimento (a) e colheita (b). Fonte: (UNICA, 2014d).....	43
Figura 2.3 – Percentual de produção de cana-de-açúcar nos principais estados produtores (adaptado de CONAB, 2014).....	44
Figura 2.4 – Mapa de distribuição da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: (UNICA, 2014e)	45
Figura 2.5 – Bagaço de cana-de-açúcar em fotografia (a) e micrografia que evidencia sua estrutura fibrosa (b) - (CORDEIRO, 2006)....	47
Figura 2.6 – Bagaço de cana-de-açúcar e diferentes cinzas residuais geradas após queima do bagaço em caldeira (CORDEIRO, 2006)	48
Figura 2.7 – Morfologia das partículas da cinza residual do bagaço de cana e detalhe da presença de partícula de quartzo na cinza (CORDEIRO, 2006)	48
Figura 2.8 – Efeito físico da adição de pozolanas: grãos maiores representam o cimento e os grãos menores a pozolana (SOUZA, 2011)	50
Figura 2.9 – Equipamento de Ultrassom (PUNDIT)	62
Figura 2.10 – Ondas longitudinais (compressão) (MIKULIC et al., 2005 adaptada por IRRIGARAY, 2012)	63
Figura 2.11 – Ondas transversais (cisalhamento) (MIKULIC et al., 2005 adaptada por IRRIGARAY, 2012)	63
Figura 2.12 – Ondas de superfície (Rayleigh) (MIKULIC et al., 2005 adaptada por IRRIGARAY, 2012)	64
Figura 2.13 - Esquema de funcionamento do aparelho de ultrassom ...	64
Figura 2.14 - Modos de transmissões das ondas ultrassônicas de acordo com a posição dos transdutores na superfície do concreto	65
Figura 2.15 – Influência da temperatura e idade de cura na VPU (YE et al., 2004)	69
Figura 2.16 – Simplificação da evolução de VPU em três estágios característicos (YE et al., 2004).....	70
Figura 2.17 – Estágio inicial de suspensão das partículas de cimento (YE et al., 2004).....	71
Figura 2.18 – Caminho sólido de percolação (YE et al., 2004).....	71
Figura 2.19 – Fase sólida totalmente conectada (YE et al., 2004).....	72

Figura 2.20 – VPU ao longo do tempo: Concreto sem aditivos (MIKULIC et al., 2005).....	73
Figura 2.21 – VPU ao longo do tempo: Concreto com aditivo retardador de pega (MIKULIC et al., 2005)	73
Figura 2.22 – Mudanças de VPU nas pastas de cimento Portland (CHEN; SHUI; LI, 2010)	74
Figura 2.23 – Resultados dos ensaios I (a) e II (b) com o método do ultrassom e com aparelho de Vicat em pastas de cimento CP II (VICENTE; PRISZKULNIK; KUPERMAN, 2010).....	75
Figura 2.24 – Variação no pico da amplitude da onda no processo de hidratação do cimento (DONGYU et al., 2012).....	76
Figura 2.25 – Diagrama de reações de hidratação do cimento em diferentes períodos de hidratação (DONGYU et al., 2012).....	77
Figura 2.26 – Estágios da curva típica de velocidade de propagação da onda ultrassônica em relação ao tempo (SILVA et al., 2011)	77
Figura 2.27 – Estágios do processo de hidratação do cimento: (a) taxa de evolução de calor, (b) grau de hidratação (Adaptado de TRTNIK e GAMS, 2014).....	78
Figura 3.1 – Esquema das etapas que compõem o programa experimental	82
Figura 3.2 – Usina Sucroalcooleira escolhida para coleta dos materiais utilizados na pesquisa	83
Figura 3.3 – Peneira rotativa para retirar da água de lavagem o material grosseiro.....	85
Figura 3.4 – Clarificador de água por sedimentação das partículas	86
Figura 3.5 – Filtração a vácuo da água contida na lama em desaguador horizontal	86
Figura 3.6 – Amostra de resíduo (ACBC) utilizado na coleta na usina.	87
Figura 3.7 – Restos de bagaço de cana-de-açúcar retidos na peneira de 2,0mm proveniente do peneiramento da ACBC in natura.....	88
Figura 3.8 – Dispositivo para monitoramento de velocidades de pulsos ultrassônicos baseado no dispositivo de Irrigaray (2012).....	96
Figura 3.9 – Granulometria da areia natural de rio, areia de britagem e composição da areia natural de rio (58%) mais areia de britagem (42%)	100
Figura 3.10 – Granulometria do agregado graúdo.....	101
Figura 3.11 – Granulometria da ACBC in natura após peneiramento em peneira de abertura de 2 mm para separação de material que não sofreu combustão completa na usina	102

Figura 3.12 – Granulometria à laser das partículas passantes pela peneira com abertura de 2 µm da ACBC in natura, ACBC-10m, ACBC-3h e finos dos agregados miúdos	103
Figura 4.1 – Morfologia de partículas da ACBC-10m por MEV (A - aumento de 150x; B - aumento de 500x).....	109
Figura 4.2 – Morfologia de partículas da ACBC-3h por MEV (A - aumento de 150x; B - aumento de 500x).....	110
Figura 4.3 – Morfologia das partículas da ACBC-R por MEV (A - aumento de 150x; B - aumento de 500x).....	110
Figura 4.4 – Evolução da resistência à compressão das pastas de ACBC com hidróxido de cálcio.....	115
Figura 4.5 – Efeito do tratamento da ACBC-10m na evolução da resistência à compressão da pasta com hidróxido de cálcio	116
Figura 4.6 – Efeito do tratamento da ACBC-3h na evolução da resistência à compressão da pasta com hidróxido de cálcio	116
Figura 4.7 – Efeito do tratamento da ACBC-R na evolução da resistência à compressão da pasta com hidróxido de cálcio	117
Figura 4.8 – Difratoograma de raios X da pasta de hidróxido de cálcio com ACBC aos 28 dias.....	118
Figura 4.9 – DSC para pasta de hidróxido de cálcio com ACBC in natura aos 28 dias.....	119
Figura 4.10 – Comparação das relações a/c para manter-se a trabalhabilidade em 8±2 cm nas diferentes misturas de concreto....	121
Figura 4.11 – Velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo para misturas de concreto com 5% de ACBC.....	122
Figura 4.12 – Velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo para misturas de concreto com 10% de ACBC.....	122
Figura 4.13 – Velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo para misturas de concreto com 20% de ACBC.....	123
Figura 4.14 – Temperaturas ao longo do tempo em misturas de concreto com relação a/c = 0,44	123
Figura 4.15 – Temperaturas ao longo do tempo em misturas de concreto com relação a/c = 0,48	124
Figura 4.16 – Temperaturas ao longo do tempo em misturas de concreto com relação a/c = 0,52	124
Figura 4.17 – VPU para te à 20°C nos concretos com 5% de ACBC.	125
Figura 4.18 – VPU para te à 20°C nos concretos com 10% de ACBC	125
Figura 4.19 – VPU para te à 20°C nos concretos com 20% de ACBC	126
Figura 4.20 – Índices de consistência das misturas de argamassas conforme ASTM C 230 (2014).....	128

Figura 4.21 – Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,44$	129
Figura 4.22 – Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,48$	130
Figura 4.23 – Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,52$	130
Figura 4.24 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para argamassas com $a/c = 0,44$	133
Figura 4.25 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para argamassas com $a/c = 0,48$	134
Figura 4.26 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para argamassas com $a/c = 0,52$	134
Figura 4.27 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para te à 20°C nas argamassas com $a/c = 0,44$	135
Figura 4.28 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para te à 20°C nas argamassas com $a/c = 0,48$	135
Figura 4.29 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para te à 20°C nas argamassas com $a/c = 0,52$	135
Figura 4.30 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo das argamassas com $a/c = 0,44$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos	137
Figura 4.31 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo das argamassas com $a/c = 0,48$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos	138
Figura 4.32 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo das argamassas com $a/c = 0,52$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos	138
Figura 4.33 – Módulos de elasticidade dinâmicos ao longo do tempo para as diferentes misturas de argamassas com relação a/c de 0,44.....	140
Figura 4.34 – Módulos de elasticidade dinâmicos ao longo do tempo para as diferentes misturas de argamassas com relação a/c de 0,48.	140
Figura 4.35 – Módulos de elasticidade dinâmicos ao longo do tempo para as diferentes misturas de argamassas com relação a/c de 0,52.	141
Figura 4.36 – Correlação exponencial entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas com $a/c = 0,44$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos ...	141

Figura 4.37 – Correlação exponencial entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas com $a/c = 0,48$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos...	142
Figura 4.38 – Correlação exponencial entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas com $a/c = 0,52$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos...	142
Figura 4.39 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas com $a/c = 0,44$	144
Figura 4.40 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas com $a/c = 0,48$	144
Figura 4.41 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas com $a/c = 0,52$	145
Figura 4.42 – Correlação linear entre absorção de água por capilaridade e índice de vazios para argamassas com $a/c = 0,44$	148
Figura 4.43 – Aspecto da argamassa com ACBC-R (0,44) nas idades de (a) 28 dias e (b) 60 dias.....	149
Figura 4.44 – Aspecto da argamassa com ACBC-R (0,48) nas idades de (a) 28 dias e (b) 60 dias.....	149
Figura 4.45 – Aspecto da argamassa com ACBC-3h (0,52) nas idades de (a) 28 dias e (b) 60 dias.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros de distribuição de tamanho das partículas de diferentes frações do cimento Portland (ZHANG et al., 2011) ...	38
Tabela 2.2 – Exigências da NBR 12653 (2012).....	41
Tabela 2.3 – Composição química elementar orgânica (CHN) do bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, 2006)	46
Tabela 2.4 – Pesquisas realizadas sobre a utilização de cinzas residuais em misturas de concretos e argamassas em substituição do cimento.....	53
Tabela 2.5 – Pesquisas realizadas sobre a utilização de cinzas residuais em substituição de agregados miúdos em misturas de concretos e argamassas	57
Tabela 3.1 – Nomenclatura adotada para os diferentes tratamentos da ACBC.....	89
Tabela 3.2 – Dimensão dos grãos da ACBC in natura, ACBC-10m, ACBC-3h e finos das areias.....	103
Tabela 3.3 – Materiais necessários para a produção de 1 m ³ de concreto (em massa).....	105
Tabela 3.4 – Traços para produção das argamassas de referência (em massa)	106
Tabela 3.5 – Traços para produção das argamassas com ACBC (em massa)	107
Tabela 4.1 – Composição química das areias de cinzas por FRX e PF	111
Tabela 4.2 – Índice de atividade pozolânica para a ACBC in natura de acordo com a NBR 5751 (2012).....	113
Tabela 4.3 – Índice de desempenho pozolânico com cimento Portland de acordo com NBR 5752 (2014) e área de superfície específica de acordo com NBR 16372 (2015).....	113
Tabela 4.4 – Quantitativo de materiais para moldagem das pastas com hidróxido de cálcio.....	114
Tabela 4.5 – Nomenclatura adotada aos concretos deste programa experimental.....	120
Tabela 4.6 – Resistência à compressão média aos 28 dias das misturas de concreto.....	127
Tabela 4.7 – Nomenclatura adotada para as argamassas deste programa experimental.....	127
Tabela 4.8 – Tempos de início de pega (I.P.) e fim de pega (F.P.) das argamassas obtidos pelo método de resistência à penetração....	131

Tabela 4.9 – Tempos de início de pega (I.P.) e fim de pega (F.P.) das argamassas para idade equivalente à 20°C obtidos pelo método de resistência à penetração	132
Tabela 4.10 – Resistência à compressão das misturas de argamassa ...	137
Tabela 4.11 – Resistências à compressão estimadas com correlações entre VPU e f_c para idade de 1 dia.....	143
Tabela 4.12 – Valores médios de índices de vazios, massa específica, absorção de água total e absorção por capilaridade das argamassas com $a/c = 0,44$ e seus respectivos desvios padrão (DV).	146
Tabela 4.13 – Valores médios de índices de vazios, massa específica, absorção de água total e absorção por capilaridade das argamassas com $a/c = 0,48$ e seus respectivos desvios padrão (DV).	147
Tabela 4.14 – Valores médios de índices de vazios, massa específica, absorção de água total e absorção por capilaridade das argamassas com $a/c = 0,52$ e seus respectivos desvios padrão (DV).	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Al_2O_3
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACBC – Areia de Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar
ACBC – Areia de Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar
ACBC-10m – Areia de Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar moída por 10 minutos
ACBC-3h – Areia de Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar moída por 3 horas
ACBC-R – Areia de Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar requeimada
AFm – Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
AFt – Etringita
 Al_2O_3 – Óxido de Alumínio
ASTM – American Society for Testing and Materials
a/c – relação água/cimento
C - $\text{Ca}(\text{OH})_2$
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Hidróxido de Cálcio
CH – Hidróxido de cálcio
CP – Corpo-de-prova
CTC – Centro de Tecnologia Canavieira
CV – Coeficiente de Variação
 C_2S – Silicato dicálcico
 C_3A – Aluminato tricálcico
 C_3S – Silicato tricálcico
 C_4AF – Ferro aluminato tetracálcico
C-A-H – Aluminato de cálcio hidratado
C-A-S-H – Sílico-aluminato de cálcio hidratado
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
EPA - Environmental Protection Agency
f – Frequência de vibração
FRX – espectrometria de fluorescência de raios-X
IAP – Índice de Atividade Pozolânica
DMC – Dimensão Máxima Característica
DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura
DV – Desvio Padrão
 D_{50} – Tamanho abaixo do qual se encontram 50% da massa do material
 E_a – Energia de ativação
 E_d – Módulo de elasticidade dinâmico
 f_c – Resistência à compressão do concreto
F.P. – Fim de Pega

H – H₂O (água)

I.P. – Início de Pega

L – Distância (m)

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MF – Módulo de Finura

NBR – Norma Brasileira

PF – Perda ao Fogo

RAA – Reação álcali-agregado

Ref – Argamassa de referência

S - SiO₂

SiO₂ – Sílica (Dióxido de Silício)

t – Idade (horas)

T – tempo (s)

t_e – Idade equivalente à idade para uma determinada temperatura de referência (horas)

V – Velocidade (m/s)

VPU – Velocidade de Pulsos Ultrassônicos

λ – Comprimento da onda

v – Coeficiente de Poisson dinâmico

ρ – Massa Específica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	27
1.1.	ORIGINALIDADE	30
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	31
1.3.	OBJETIVO GERAL.....	31
1.4.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
2.	REVISÃO DE LITERATURA	33
2.1.	ADIÇÕES MINERAIS	33
2.1.1.	Aspectos Gerais	33
2.1.2.	Efeito da Dimensão dos Grãos	36
2.1.3.	Pozolana	40
2.1.4.	Atividade Pozolânica.....	41
2.2.	CINZAS RESIDUAIS DO BAGAÇO DA CANA-DE AÇÚCAR.....	42
2.2.1.	Produção da Cana-de-Açúcar	42
2.2.2.	Bagaço da Cana-de-Açúcar	45
2.2.3.	Cinza Residuais do Bagaço da Cana-de-Açúcar	47
2.2.4.	Aplicações da Cinza Residual do Bagaço da Cana-de-açúcar .	49
2.2.4.1.	Utilização da Cinza Residual em Argamassas e Concretos	52
2.2.4.2.	Utilização da Cinza Residual como Agregado Miúdo.....	56
2.3.	MÉTODO DA VELOCIDADE DE PULSOS ULTRASSÔNICOS	61
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	81
3.1.	MATERIAIS	83
3.1.1.	Coleta da ACBC e Características da Usina.....	83
3.1.2.	Agregados Miúdos	87
3.1.3.	Agregado Graúdo	87
3.1.4.	Cimento	87
3.1.5.	Aditivo.....	88
3.1.6.	Água	88
3.2.	MÉTODOS.....	88
3.2.1.	Tratamentos da ACBC	88
3.2.2.	Caracterização dos Materiais.....	89
3.2.2.1.	Análise Granulométrica	89
3.2.2.2.	Granulometria à Laser.....	90
3.2.2.3.	Massa Específica.....	90
3.2.2.4.	Massa Unitária	91
3.2.2.5.	Superfície Específica	91
3.2.2.6.	Composição Química.....	91

3.2.2.7. Resistência à Compressão de Pastas com Hidróxido de Cálcio	91
3.2.2.8. Difração de Raios X.....	92
3.2.2.9. Atividade Pozolânica.....	93
3.2.2.10. Determinação do Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias.....	93
3.2.2.11. Índice de Atividade Pozolânica com Cal aos 7 dias.....	93
3.2.2.12. Análise Térmica Diferencial.....	93
3.2.2.13. Consistência.....	94
3.2.2.14. Monitoramento da Pega.....	94
3.2.2.15. Resistência à Compressão.....	97
3.2.2.16. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	97
3.2.2.17. Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	98
3.2.2.18. Caracterização Física das Argamassas.....	98
3.3. DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E ARGAMASSAS.....	100
3.3.1. Granulometria dos Agregados e ACBC.....	100
3.3.2. Definição do Traço e Produção das Misturas de Concreto.....	104
3.3.3. Definição do Traço e Produção das Misturas de Argamassa.....	105
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	109
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ACBC.....	109
4.1.1. Caracterização da ACBC em Pastas com Hidróxido de Cálcio.....	114
4.2. CONCRETOS COM AREIAS DE CINZAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	119
4.2.1. Trabalhabilidade dos Concretos.....	120
4.2.2. Velocidade dos Pulsos Ultrassônicos nos Concretos.....	122
4.2.3. Resistência à Compressão dos Concretos.....	126
4.3. ARGAMASSAS COM AREIAS DE CINZAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	127
4.3.1. Trabalhabilidade dos Concretos.....	128
4.3.2. Monitoramento das Temperaturas nas Argamassas Frescas.....	129
4.3.3. Início e Fim de Pega das Argamassas pelo Método de Resistência à Penetração.....	130
4.3.4. Velocidade dos Pulsos Ultrassônicos nas Argamassas.....	133
4.3.5. Resistência à Compressão das Argamassas.....	136
4.3.6. Correlações entre Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	139
4.3.7. Absorção de Água e Índice de Vazios.....	144
4.3.8. Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV).....	148
4.4. Discussão dos Resultados.....	150

5.	CONCLUSÕES.....	153
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	157
7.	REFERÊNCIAS	159
	ANEXO 1.....	171
	ANEXO 2.....	173
	ANEXO 3	180

1. INTRODUÇÃO

A produção de cana-de-açúcar é uma das principais atividades agrícolas no mundo e um dos seus subprodutos da indústria da cana-de-açúcar é o bagaço da cana, que é queimado para gerar energia elétrica, tornando a indústria sucroalcooleira autossustentável energeticamente. Esta queima gera cinza residual composta de areia e cinzas, material rico em sílica, com potencial de atividade pozolânica e de efeito de preenchimento em misturas de concreto e argamassa. A produção desta cinza residual tem aumentado significativamente nos últimos anos e deverá seguir esta tendência devido à expansão da produção de álcool combustível.

Almeida (2013), baseando-se em diversos estudos, propôs uma nomenclatura diferenciada para as cinzas residuais provenientes do bagaço da cana-de-açúcar, de acordo com a forma de obtenção e tipo de aplicação, as quais foram adotadas neste trabalho. Ele propôs o nome CBC (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) para os resíduos obtidos a partir de processos específicos para uso como material pozolânico e ACBC (areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar) para resíduos obtidos diretamente das usinas para uso como material inerte.

O uso da CBC em substituição parcial ao cimento, ou da ACBC em substituição parcial aos agregados miúdos, pode contribuir para reduzir o impacto ambiental causado pela mineração de rochas ou pela extração de areia em suas jazidas e leitos de rios, que são beneficiados para serem utilizados em misturas de concreto e argamassa. Também reduzir o impacto ambiental causado pelo descarte incorreto destes resíduos nas lavouras ou locais inapropriados, sendo que é comum a prática de eliminação da ACBC nas plantações de cana-de-açúcar como fertilizante, sendo que os produtores afirmam que este processo é capaz de dar destino a todos os resíduos dentro da própria cadeia de produção. Embora tratada como uma iniciativa ambientalmente correta, esta prática ignora o uso de agrotóxicos nas plantações e permanência destes produtos no solo (SALES e LIMA, 2010).

Existem pesquisas desenvolvidas sobre a utilização de CBC em misturas de concreto com enfoque na substituição parcial do cimento nas misturas (DE PAULA et al., 2009; CORDEIRO et al., 2012; RUKZON e CHINDAPRASIRT, 2012; BAHURUDEEN et al., 2015). Nessas pesquisas, a CBC é beneficiada através de processos de requeima e moagem, para eliminação de material orgânico e aumento da quantidade de finos, com o intuito de melhorar a atividade pozolânica.

Ainda, há outra frente de pesquisas (MACEDO et al., 2009; BESSA, 2011; MONDANY et al., 2013) que utilizam a ACBC como

material substituto da areia em misturas de concreto, por ser um material de baixa atividade pozolânica, com índices de pozolanicidade inferiores aos valores mínimos exigidos por normas, com quantidade elevada de matéria orgânica, queimada em condições não controladas e à temperaturas muito elevadas. A ACBC é geralmente proveniente de queima em altas temperaturas e tempo reduzido, o que proporciona cinzas residuais com presença de material orgânico, que não passaram por combustão completa. Com o objetivo de melhorar a qualidade da cinza coletada para possível uso em misturas de concreto, diferentes tratamentos de peneiramento, moagem e requeima são recomendados.

Rukzon e Chindaprasirt (2012) utilizaram o moinho de bolas para cominuir cinza do bagaço de cana-de-açúcar e posteriormente utilizar a parte passante na peneira de $45\mu\text{m}$ na substituição do cimento em misturas de concretos, o que proporcionou aumento das reações pozolânicas, aumentando assim, a resistência do concreto. Cordeiro et al. (2010) produziram cinzas ultrafinas através de moagem em moinho vibratório por 120 minutos para substituição de parte do cimento em misturas de concreto de alto desempenho, conseguindo melhores propriedades reológicas e baixa penetração de íons cloro, sem redução da resistência. Tantawy et al. (2012) queimaram a CBC por 3 horas em forno mufla a 700°C , e sua utilização em misturas de argamassa proporcionou redução do tempo de pega e menor porosidade devido ao efeito pozolânico da cinza. Frías et al. (2011) queimou o bagaço em dois patamares de temperatura controlada, sendo o primeiro a uma temperatura de 400°C por 20 minutos, mais um segundo patamar de 800°C por 60 minutos. Também com dois patamares de temperatura, Cordeiro et al. (2009) queimou o bagaço, e as condições de queima que apresentaram melhores resultados de pozolanicidade foi a queima por 03 horas a 350°C mais 03 horas a 600°C .

Independente do processo de beneficiamento, devido a sua granulometria final, a CBC pode alterar a taxa de hidratação do cimento nas idades iniciais, devido ao efeito físico de compactidade influenciando no empacotamento da mistura, preenchendo os vazios entre as partículas de cimento (SOUZA, 2011), o que interfere no processo de endurecimento da mistura de concreto nas primeiras idades. O processo de hidratação é um parâmetro importante para definição dos tempos de transporte, execução da vibração da mistura, da remoção de formas e escoramentos, da execução de acabamentos superficiais, entre outras atividades construtivas.

Os processos de hidratação e de formação da microestrutura influenciam diretamente as características físicas, mecânicas e

funcionais de concretos e argamassas (SHE et al., 2013). Pode-se avaliar a taxa de hidratação de forma indireta utilizando-se os tempos de pega da mistura. Entende-se como tempo de início e fim de pega os tempos decorridos para a passagem do material do estado líquido para o estado sólido, e começo do ganho de resistência, respectivamente (MIKULIC et al., 2005). O método utilizado para a definição destes tempos, como descrito pela norma ASTM C403 (2008), consiste na medição da resistência à penetração ao longo do tempo em misturas de argamassa ou argamassa de concreto peneirado. De acordo com Liu et al. (2014) este método não é adequado para aplicação em campo. Uma alternativa de monitoramento contínuo nas primeiras idades é a aplicação de ondas ultrassônicas, como explorado em diversos estudos (YE et al., 2004; MIKULIC et al., 2005; CHEN et al., 2010; IRRIGARAY, 2012). O desenvolvimento da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) em um material está diretamente relacionado ao desenvolvimento da microestrutura. Ondas mecânicas, como a de ultrassom, trafegam mais rapidamente em materiais mais rígidos.

Sendo assim, a presente pesquisa propõe investigar a contribuição da adição de areia de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e o seu efeito como material cimentício suplementar (MCS) nas idades iniciais e ao longo do tempo nos concretos e argamassas, produzidos com substituição parcial dos agregados miúdos. Para tanto, três misturas de argamassa com relações água/cimento de 0,44, 0,48 e 0,52 e uma mistura de concreto adaptada de uma dosagem padrão, cedido por uma concreteira local, foram testadas. Para as misturas de argamassas e concretos foram utilizados três diferentes tratamentos realizados com a ACBC: moagem em moinho de bolas por 10 minutos, para homogeneização do material; moagem em moinho de bolas por 3 horas, para refinar as partículas e melhorar o empacotamento às misturas; e requeima por 03 horas a 300°C mais 03 horas a 600°C, para diminuir a quantidade de materiais orgânicos presentes pela combustão incompleta na usina, o que pode proporcionar atividade pozzolânica às misturas. O teor de substituição nas argamassas foi de 7,5% para todos os tipos de ACBC, enquanto que para o concreto os teores foram de 5, 10 e 20%. Os tempos de pega e o desenvolvimento da velocidade ultrassônica nas primeiras 24 horas destas misturas foram comparados com os de argamassas e concretos de referência, produzidos sem ACBC.

A ACBC utilizada era proveniente da maior usina sucroalcooleira do estado do Paraná, localizada na região Noroeste do Estado, com capacidade de produção de 4 milhões de toneladas de cana

por safra para produção de álcool e açúcar, gerando 360 mil toneladas de ACBC por safra.

1.1. ORIGINALIDADE

Este trabalho investiga o processo de hidratação e ganho de resistência em concretos e argamassas, com adições de areia de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial de agregados miúdos, com o auxílio de leituras de velocidade dos pulsos ultrassônicos.

Apesar dos muitos estudos já realizados sobre a utilização de cinzas residuais, provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar, em misturas de concreto, não se tem registro de um emprego em escala comercial, seja no Brasil ou qualquer outro país produtor de açúcar e álcool, como já acontece com a cinza proveniente da casca de arroz. Provavelmente este fato está relacionado a divergências de resultados nos estudos. Sabe-se que a cinza residual pode proporcionar o efeito filer e/ou atividade pozolânica (CORDEIRO et al., 2012; DAL MOLIN FILHO, 2013; ALMEIDA, 2013), mas devido aos diferentes processos de produção da cana-de-açúcar e geração das cinzas nas usinas, com diferentes processos de moagem e queima do bagaço, não se tem padronização de geração das mesmas.

Parte deste estudo está baseado no método apresentado por Irrigaray (2012), que propõe a correlação da velocidade dos pulsos ultrassônicos da pasta com a resistência à compressão do concreto. Ele considera que os agregados miúdos e graúdos representam o esqueleto do concreto e não sofrem alteração com o avanço da idade, sendo o processo de hidratação da pasta o responsável pelo ganho da velocidade dos pulsos ultrassônicos.

Silva et al. (2013), com a utilização do ultrassom em misturas de concretos frescos, detectaram aumentos da velocidade de propagação da onda que, logo em seguida, retornavam a valores iniciais. Explicam que tal fato acontece devido à formação das amas (subconjuntos de produtos de hidratação e de grãos de cimento ligados mecanicamente) de forma aleatória, que em determinados momentos formam caminhos contínuos capazes de atravessar o sistema, porém não fortes o suficiente para suportar as deformações impostas durante a hidratação. As ligações voltam a se fortalecer com a formação de novos produtos de hidratação, o que eleva a velocidade dos pulsos ultrassônicos.

A resistência à compressão é uma das propriedades mais estudadas do concreto, pois usualmente serve de medida para dosagens e controle de aceitação de concretos em obras. A utilização de areias de

cinzas do bagaço da cana-de-açúcar como material cimentício suplementar (MSC) podem proporcionar valores maiores de resistência à compressão, devido a ocorrência do efeito pozolânico e/ou do efeito de preenchimento.

A presente pesquisa diferencia-se dos demais estudos que avaliam a hidratação de concretos e argamassas por utilizar o método de ultrassom para o estudo dos tempos de pega em misturas de concretos e argamassas, no estado fresco, com adições da areia de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. Tal estudo agrega conhecimentos das características proporcionadas por este resíduo, assim como, conhecimentos do comportamento da evolução da hidratação do cimento em idades iniciais.

1.2. JUSTIFICATIVA

A necessidade de baixo impacto ambiental para a construção civil leva à reutilização de materiais e emprego de resíduos como materiais ou adições, tornando o seguimento mais sustentável. A utilização de resíduos da indústria sucroalcooleira na construção civil, como apresentado neste trabalho, através da substituição de parte dos agregados miúdos pela areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, pretende diminuir o uso de areias retiradas das encostas de rios e dar um fim adequado ao grande volume gerado deste tipo de resíduo.

A utilização deste resíduo leva à novas investigações, afim de encontrar soluções tecnológicas viáveis, para que, além de sustentável, seu uso possa trazer benefícios para a qualidade dos produtos.

A adição de ACBC em misturas cimentícias tem o potencial para conferir maior resistência à compressão e um efeito acelerador no processo de hidratação do cimento nas primeiras idades, além de preencher os vazios entre as partículas e possuir um provável efeito pozolânico.

1.3. OBJETIVO GERAL

Investigar os efeitos da substituição parcial de agregados miúdos por areias de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar no processo de hidratação do cimento.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são definidos:

- Investigar diferentes processos de beneficiamento da ACBC para melhor adequação como material cimentício suplementar (MCS);

- Verificar a eficácia do método do ultrassom no monitoramento do processo de hidratação em concretos e argamassas no estado fresco;
- Identificar as características físico-químicas da ACBC e possíveis efeitos pozolânicos que viabilizam seu uso como MCS.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conceitos técnicos e científicos mais relevantes da revisão de literatura para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1. ADIÇÕES MINERAIS

2.1.1. Aspectos Gerais

De acordo com a NBR 11172 (1990), o termo “adição” é utilizado para produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos com a finalidade de alterar suas características. Já o termo “aditivo” é designado ao produto químico adicionado em pequenos teores às caldas, argamassas e concretos com a finalidade de alterar suas características no estado fresco e/ou no endurecido.

Normalmente as adições utilizadas no cimento são resíduos provenientes de outras indústrias que, em grande quantidade, teriam que ser descartados em lugares impróprios, o que geraria riscos de contaminação do solo e fontes de água. Sendo assim, seu uso nas indústrias de cimento e de concreto, substituindo parcialmente o clínquer ou cimento, não só reduz o impacto ambiental causado pelo descarte dos resíduos, mas também o volume de extração de matéria-prima por parte da indústria da construção civil, preservando os recursos naturais limitados (DAL MOLIN, 2011).

Algumas adições são conhecidas também como materiais cimentícios suplementares (MCS), amplamente utilizadas em concretos, misturados em cimentos ou adicionadas separadamente na betoneira. O uso de materiais cimentícios suplementares, tais como escória de alto-forno, um produto secundário da produção de ferro-gusa, ou cinzas volantes, resultantes da combustão de carvão, representa uma solução viável para substituir parcialmente o cimento Portland. O uso de tais materiais, em que nenhum processo de clínquerização adicional está envolvido, leva a uma redução significativa das emissões de CO₂ por tonelada de materiais cimentícios (a moagem, mistura e transporte do concreto utiliza muito pouca energia em comparação ao processo de formação de clínquer), sendo um meio de utilização dos subprodutos de processos de fabricação industrial (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Com o uso de adições, a média mundial de emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido é de 750 kg, sendo que no Brasil não chega a 600 kg por tonelada, graças às modernas indústrias cimenteiras

instaladas e às normas brasileiras de cimento em vigor (DAL MOLIN, 2011). Nos Estados Unidos, segundo a EPA, a média foi de 970 kg de CO₂ por tonelada de cimento (HANLE, JAYAMARAN; SMITH, 2001). O potencial de redução de CO₂ é também associado à mudança no uso do combustível usado na produção do clínquer como, por exemplo, a substituição de combustível fóssil por biomassa a um poder calorífico equivalente (resíduos animais, produtos da madeira, lama) ou biomassa de cultivo (algas, gramíneas, espécies de rápido crescimento) (EPA, 2010).

As adições minerais, em geral, resultam em materiais cimentícios com melhores características técnicas que, quando quimicamente ativas podem aumentar a resistência ao ataque de sulfatos e diminuir as expansões decorrentes das reações álcali-agregado (RAA). Porém, tais vantagens dependem de uma série de parâmetros da adição, tais como a finura, a forma das partículas e o diâmetro das partículas, a área superficial específica, a relação água/aglomerante, a composição química, mineralógica e o mais importante, sua quantidade adicionada (DAL MOLIN, 2011).

É consenso na literatura que as adições minerais podem ser caracterizadas conforme sua ação físico-química, como material cimentante, filer e material pozolânico.

O material cimentante é aquele que não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). No entanto, sua auto hidratação normalmente é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formada é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Para acelerar a hidratação, faz-se o uso como adição ou substituição ao cimento Portland. Um exemplo é a escória granulada de alto-forno.

O filer é uma adição mineral finamente dividida e sem atividade química. Seu uso se resume ao efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

Já a pozolana, de acordo com a ASTM C618 (2012), é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, tem pouco ou nenhum valor cimentício. Quando finamente subdividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentícias. É fundamental que a pozolana seja finamente subdividida pois, somente assim a sílica pode combinar com o hidróxido de cálcio,

liberado na hidratação do cimento Portland, na presença de água para formar silicatos estáveis que tenham propriedades cimentícias.

As principais adições minerais são: pozolanas naturais, cinza volante, sílica ativa, metacaulim, cinza da casca de arroz, escória granulada de alto-forno e filer. Atualmente, novas adições estão sendo estudadas, como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, objeto de estudo desta pesquisa. Os grandes desafios do uso consistem em assegurar a qualidade e controle desses materiais, sendo que a produção local e uso também no local, agregam na redução do CO₂ emitidos pela indústria cimenteira.

A cinza proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) apresenta como principal composto químico a sílica, o que normalmente é encontrada em quantidade acima de 60% em massa. Conforme as condições de queima, pode-se manter a sílica do bagaço em estado amorfo, o que possibilita o emprego desse resíduo como pozolana (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009a).

Misturas de materiais cimentícios suplementares (MCS) com cimento Portland conduzem a um sistema de hidratação mais complexo do que a hidratação somente do cimento. Reações hidráulicas de MCS ocorrem simultaneamente e podem influenciar na reatividade de outros compostos, sendo a maioria das reações de MCS mais lentas do que as reações do clínquer (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Lothenbach, Scrivener e Hooton (2011) estudaram materiais cimentícios suplementares. Segundo os autores, a presença de MCS influencia na quantidade e tipo de hidratos formados em misturas com cimento, influenciando no volume, na porosidade e na durabilidade da mistura. A alteração importante está na composição da fase C-S-H, o qual leva a menores relações de Ca/Si, mesmo com a portlandita ainda presente na maioria das misturas. Para MCS contendo alumina, o C-S-H também incorpora uma grande quantidade deste composto. Além das alterações em C-S-H, a quantidade de aluminatos hidratados pode aumentar e, quando o MCS contém magnésio, uma fase de hidrotalcita (Mg₆Al₂(OH)₁₆CO₃.4H₂O) pode aparecer.

A hidrotalcita é um composto de estrutura cristalina lamelar de camadas positivamente carregadas de hidróxido de Mg e Al com região interlamelar de diferentes ânions e moléculas de água (SALOMÃO, R.; AMARAL, L. F.; PANDOLFELLI, 2010).

Em idades precoces, o efeito filer domina, levando a um aumento de reações do clínquer, às vezes também com maior velocidade, devido ao maior espaço em relação à quantidade de clínquer e aumento das taxas de nucleação. A hidratação do aluminato, que

ocorre após o pico principal de hidratação do silicato, é muitas vezes mais sensível aos efeitos de nucleação.

As reações de MCS são difíceis de medir, mas alguns parâmetros são claros: a reação de MCS (incluindo sílica ativa) só começa depois do primeiro dia ou então, quando o pH da solução aumenta devido ao consumo de sulfato e liberação de álcalis pela reação dos compostos do clínquer. No entanto, a menor relação entre Ca e Si em C-S-H pode levar à adsorção de álcalis, contribuindo para uma redução na taxa de reações ao longo do tempo. O tamanho das partículas de MCS é muito importante, pois as reações acontecem na superfície das mesmas, levando os materiais finos a reagirem mais rapidamente. Ainda, a temperatura é outro parâmetro muito importante, pois temperaturas mais altas aceleram significativamente a taxa de reações de MCS (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

As reações de hidratação do cimento são complexas e ainda é assunto de discussão no meio científico. Dois principais produtos da hidratação são o Ca(OH)_2 e o C-S-H. Nos cimentos modernos, podem alcançar percentuais de 20 a 25% de Ca(OH)_2 , de 60 a 70% de C-S-H e outras fases compreendidas entre 5 a 15% do total de sólidos (TAYLOR, 1990). As fases cristalinas podem ser:

- AFt ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) pode conter Si substituída por Al, CO_3^{2-} por SO_4^{2-} ;
- AFm ($3\text{C}_4\text{ASH}_{12}$);
- hidrogarnete, estratlingita, ou gehlenita hidratada (C_2ASH_8);
- portlandita (Ca(OH)_2);
- hidrocalcita (quando Mg/Al for variável).

No entanto, o principal produto de hidratação (C-S-H) é praticamente amorfo na difração de raios X (DRX). Na formação da fase sólida, o teor de portlandita (Ca(OH)_2) e a relação Ca/Si do C-S-H podem ser alteradas pela presença do material cimentício suplementar (MCS). No cimento Portland normal, o C-S-H tem a relação Ca/Si de aproximadamente 1,7 (TAYLOR, 1990).

2.1.2. Efeito da Dimensão dos Grãos

As dimensões das partículas das adições em materiais cimentícios influenciam na reatividade da mistura, de acordo com estudos já mencionados (DAL MOLIN, 2011 e LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Wellenkamp (1999) em seu trabalho de revisão sobre a moagem fina e ultrafina de minerais industriais, classifica como materiais finos os de granulometria menor que $100 \mu\text{m}$ e os materiais ultrafinos os de

granulometria menor que 10 μm . Em sua tese, Cordeiro (2006) também descreve as partículas finas e ultrafinas desta maneira.

Cordeiro (2006) estudou a utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como adições minerais em concretos. Através de diferentes configurações de moagem, uma cinza ultrafina do bagaço da cana foi selecionada para aplicação em concreto. A adição possibilitou a manutenção das propriedades mecânicas, com menor consumo de cimento Portland e com reduzido desprendimento de calor. Ainda melhorou as propriedades do concreto fresco, em relação às misturas de referência, aumentando os valores de abatimento do tronco de cone e reduzindo a tensão cisalhante de escoamento. Proporcionou ainda a redução na absorção de água por capilaridade e na penetração acelerada de íons cloreto no concreto para uma substituição de 20% do cimento. Tal característica é promovida pela cinza ultrafina devido a sua atividade pozolânica e ao refinamento da estrutura de poros dos concretos.

A utilização de cinza residual do bagaço sem moagem não foi adequada quando usada em substituição de parte do cimento Portland pois, comprometeu significativamente a resistência em relação ao concreto convencional. Este resultado é atribuído à baixa atividade pozolânica, granulometria grosseira e modificações imposta à estrutura porosa do concreto, na utilização de cinzas sem a devida moagem, apontando assim, a importância da moagem mecânica das partículas para conferir reatividade ao material, possibilitando a aplicação de uma adição de natureza pouco reativa em concreto de alto desempenho (CORDEIRO, 2006).

Zhang et al. (2011) realizaram um estudo sobre os efeitos do tamanho das frações sobre a composição e propriedades do cimento Portland. Neste estudo separaram um cimento Portland comercial em oito diferentes frações, de acordo com o tamanho médio dos grãos, tomando D50 como dimensão média de cada tamanho de fração, conforme apresentados na Tabela 2.1. A Figura 2.1 apresenta o volume cumulativo em relação ao tamanho das partículas na distribuição do tamanho das partículas de diferentes frações do cimento Portland.

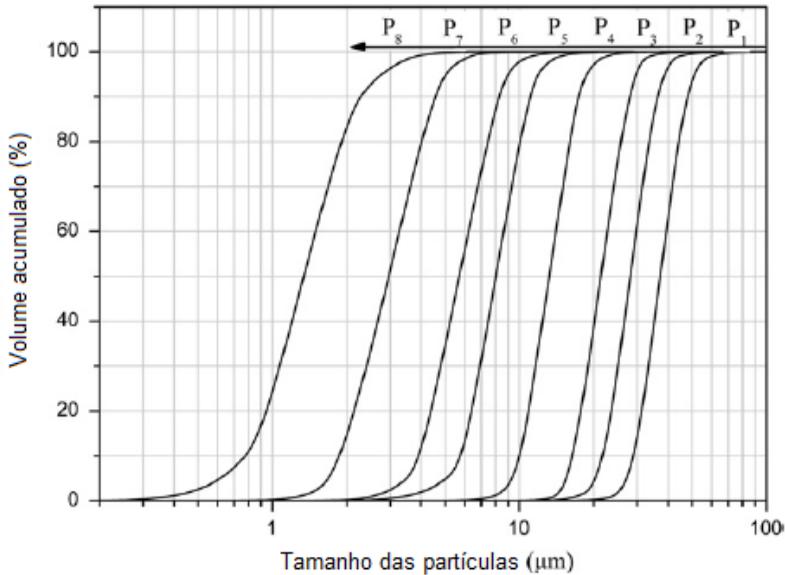


Figura 2.1 – Distribuição do tamanho das partículas das diferentes frações do cimento Portland (ZHANG et al., 2011)

Tabela 2.1 – Parâmetros de distribuição de tamanho das partículas de diferentes frações do cimento Portland (ZHANG et al., 2011)

Fração	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
D₁₀ (µm)	29,45	22,07	16,81	10,29	6,17	4,03	1,90	0,81
D₅₀ (µm)	36,37	28,27	21,48	13,19	8,24	5,61	3,09	1,50
D₉₀ (µm)	46,55	35,05	26,84	16,53	11,23	8,11	4,72	2,28

Devido às diferentes frações minerais do cimento, a composição química e mineral são susceptíveis de variar com o tamanho das partículas. Com a diminuição do tamanho médio das frações de cimento Portland, a quantidade de C_3S aumenta gradualmente e $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ aumenta muito, enquanto que C_2S diminui drasticamente e C_4AF diminui levemente (ZHANG *et al.*, 2011).

Zhang et al. (2011), com os estudos realizados, classificaram as frações de cimento Portland em três categorias, de acordo com o desempenho das propriedades apresentadas em idades iniciais e avançadas:

- I. Frações Grossas, com frações maiores do que $24\ \mu\text{m}$ ($D_{50} = 36,37\ \mu\text{m}$ e $D_{50} = 28,27\ \mu\text{m}$), resultaram em menor necessidade de água, menor calor de hidratação e menor grau de hidratação final, desempenhando um efeito filler, contribuindo pouco para o desenvolvimento da resistência desejada.
- II. Frações Médias, referindo-se a frações na faixa de 8 a $24\ \mu\text{m}$ ($D_{50} = 13,19\ \mu\text{m}$ e $D_{50} = 8,24\ \mu\text{m}$), possuem baixa exigência de água e taxa de hidratação adequada em idades precoces, resultando em resistência à compressão aceitável aos três dias, devido à alta densidade de empacotamento inicial da pasta de cimento e à formação de produtos de hidratação. Além disso, o grau de hidratação destas frações continua a aumentar rapidamente após o período de indução, atingindo 90% ou mais, com a idade de 28 dias. Estas frações resultaram em resistência à compressão muito maior aos 28 dias quando comparadas às outras frações e ao cimento em sua forma inicial.
- III. Frações Finas, que correspondem às partículas mais finas do cimento, menores que $8\ \mu\text{m}$ ($D_{50} = 3,98\ \mu\text{m}$ e $D_{50} = 1,50\ \mu\text{m}$), resultaram em rápida taxa de hidratação e alto grau de hidratação nas primeiras idades (grau de hidratação $> 80\%$ em 3 dias) devido à grande área superficial específica e altos índices de C_3S e C_3A . Embora haja grande quantidade de produtos de hidratação, microestruturas soltas são formadas em idades precoces devido à elevada exigência de água. As partículas de cimento não são suficientes para a continuidade da hidratação e poucos produtos de hidratação são gerados para o preenchimento dos poros em idades mais avançadas. Sendo assim, frações finas possuem resistência à compressão relativamente alta aos três dias e relativamente baixa aos 28 dias.

Tanto as frações finas, quanto as frações grossas do cimento Portland podem conferir características indesejáveis em mistura cimentícias. Para produção de cimento Portland são recomendadas as frações médias. Para MCS de elevada reatividade são sugeridas frações finas e aos de baixa reatividade (ou cargas inertes) são sugeridos arranjos de frações grossas. O cimento Portland pode ser substituído por MCS (ou cargas inertes) para melhorar suas características, com nenhuma ou pequena perda de desempenho (ZHANG et al., 2011).

2.1.3. Pozolana

A NBR 5736 (1991) define a pozolana natural como material de origem vulcânica, geralmente ácidos, ou de origem sedimentar. Quanto a pozolana artificial, define como material proveniente de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividades pozolânicas.

A pozolana abrange vasta gama de matérias naturais e artificiais inertes, mas potencialmente hidráulicos. Em contato com solução alcalina contendo íon cálcio, reage formando produtos hidratados hidráulicos. Tal característica é chamada de atividade pozolânica (CINCOTTO, 2011).

Os materiais de composição silicosa ou sílico-aluminosa, com estrutura amorfa ou vítrea, apresentam atividade pozolânica, sendo o produto das reações com a cal os silicatos, aluminatos e sílico-aluminatos de cálcio, que contribuem para as resistências mecânicas do cimento e dos materiais cimentícios. A reação acontece em temperatura ambiente, sendo favorecida por temperaturas elevadas próprias do clima de determinadas regiões do país (CINCOTTO, 2011).

Uma questão importante na classificação das pozolanas é sua caracterização quanto a perda ao fogo, que é definida pela ACI 116 (2000) como uma porcentagem de perda em massa de uma amostra a uma temperatura de queima entre 900 a 1000°C. A ASTM C 618 (2012) limita o valor em até 6% de perda ao fogo para materiais pozolânicos, pois, acima disso, geralmente resulta em descoloração, segregação e baixa resistência à compressão do material com a mistura, devido a presença de carbono residual.

A NBR 12653 (2012) define materiais pozolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. A Tabela 2.2 apresenta as exigências desta norma para a classificação de uma pozolana, onde: Classe N são as pozolanas naturais e artificiais; Classe C são cinza volante e materiais resultantes da queima do carvão; e Classe E são pozolanas que não pertencem às classes N e C.

Tabela 2.2 – Exigências da NBR 12653 (2012)

Recomendações	Classe N	Classe C	Classe E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ , % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Elevados teores de sódio favorecem o surgimento de eflorescências ou de reações álcali-agregado em misturas cimentícias, por isso a limitação em 1,5% de álcalis disponíveis em Na₂O, descrito pela NBR 12653 (2012).

2.1.4. Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica compreende todas as reações que envolvem os constituintes ativos das pozolanas, hidróxido de cálcio e água. Tal definição é apresentada por Massazza (1998) que, apesar de aproximada, é bem aceita nos pontos de vista teórico e prático (CORDEIRO, 2006).

De acordo com Cordeiro (2006), *a atividade pozolânica abrange dois parâmetros principais: a quantidade máxima de hidróxido de cálcio, que pode reagir com a pozolana, e a taxa com que tal combinação se processa. Ambos os fatores dependem da natureza da pozolana e, mais precisamente, da qualidade e quantidade de fases ativas presentes (MASSAZZA, 1998). De forma geral, a combinação Ca(OH)₂-pozolana, em presença de água, varia com os seguintes fatores:*

- *Natureza das fases ativas da pozolana, conforme citado;*
- *Conteúdo de pozolana na mistura;*
- *Teor de SiO₂ ativo na pozolana;*
- *Razão Ca(OH)₂-pozolana na mistura.*

Da mesma forma, a taxa de reação é função da:

- *Área superficial da pozolana;*
- *Relação sólido-água na mistura;*
- *Temperatura.*

As reações de hidratação do silicato tricálcico, C₃S, e silicato dicálcico, C₂S, dão origem ao silicato de cálcio hidratado, C-S-H, e

hidróxido de cálcio, CH. O C-S-H não tem composição fixa e é responsável pela resistência do cimento, enquanto o CH é solúvel e influencia na durabilidade da pasta, principalmente quando sujeita a meios ácidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A reação pozolânica tem início entre 7 e 15 dias após a mistura, quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado. Assim, as reações do clínquer e da pozolana podem ser investigadas separadamente, sendo consideradas as influências mútuas dos dois processos (MASSAZZA, 1998).

Após o primeiro dia, a hidratação do cimento com incorporação de adição mineral envolve unicamente o clínquer, sendo observado que as partículas da adição se comportam como regiões de nucleação para o crescimento dos produtos de hidratação. Em estágios mais avançados, a superfície externa destas partículas parece alterada, dando início ao consumo das mesmas. Primeiramente as partículas são recobertas por uma fina camada de composição diversa daquela das partículas. Gradualmente esta camada passa a ser substituída por agulhas de C-S-H que crescem perpendicularmente à superfície. Os produtos de hidratação de um sistema cal / adição mineral são bastante similares àqueles resultantes da hidratação do cimento Portland, ocorrendo variação mais na quantidade que na natureza das fases (MASSAZZA, 1998).

2.2. CINZAS RESIDUAIS DO BAGAÇO DA CANA-DE AÇÚCAR

2.2.1. Produção da Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar, que é proveniente do sudeste asiático, começou a ser cultivada no Brasil na época da colonização, trazida pelos portugueses em 1532, e desde o século XVIII tem tradição em sua produção. No entanto, somente no século XX o país descobriu que o álcool pode ser uma fonte de energia viável (UNICA, 2014a).

Nos dias de hoje, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Na safra 2014/2015 produziu mais de 632,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar UNICA (2014b). Também é o 1º Produtor Mundial de Açúcar, responsável por 25% da produção mundial e 50% das exportações mundiais, e o 2º Produtor Mundial de Etanol, sendo responsável por 20% da produção mundial e 20% das exportações mundiais (UNICA, 2014c). A Figura 2.2 mostra plantações de cana-de-açúcar nas fases de crescimento e colheita.



Figura 2.2 – Plantações de cana-de-açúcar nas fases de crescimento (a) e colheita (b). Fonte: (UNICA, 2014d)

Elogiado mundialmente pelo forte componente renovável de sua matriz energética, o Brasil utiliza mais de 47% de toda a energia consumida no país, provindas de fontes renováveis. O setor sucroenergético tem papel-chave nesse quadro, pois a cana-de-açúcar, matéria-prima para a produção de etanol e bioeletricidade, é a segunda maior fonte de energia do país, e a previsão é que até 2021 corresponda por 18% de toda a energia consumida pelo Brasil (UNICA, 2014a).

A plantação de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira está estimada em 8.810,79 mil hectares, distribuídos em todos os estados produtores do Brasil. O estado de São Paulo é o maior produtor com 51,66%, seguido por Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul, Alagoas e Pernambuco. Nos demais estados produtores as áreas são menores, com produção abaixo de 3% (CONAB, 2014). A Figura 2.3 apresenta a distribuição percentual da produção nos principais estados produtores.

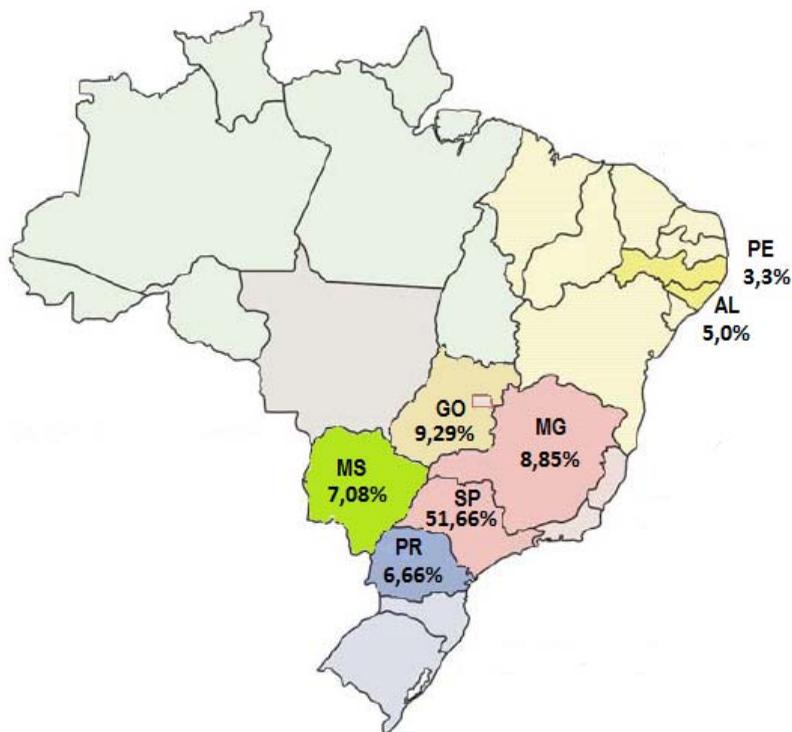


Figura 2.3 – Percentual de produção de cana-de-açúcar nos principais estados produtores (adaptado de CONAB, 2014)

A produção da cana-de-açúcar está concentrada nas regiões Centro-Sul e Nordeste. O mapa abaixo (Figura 2.4) mostra em vermelho as áreas onde se concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade, segundo dados oficiais do IBGE, UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas – SP) e do CTC (Centro de Tecnologia Canavieira).

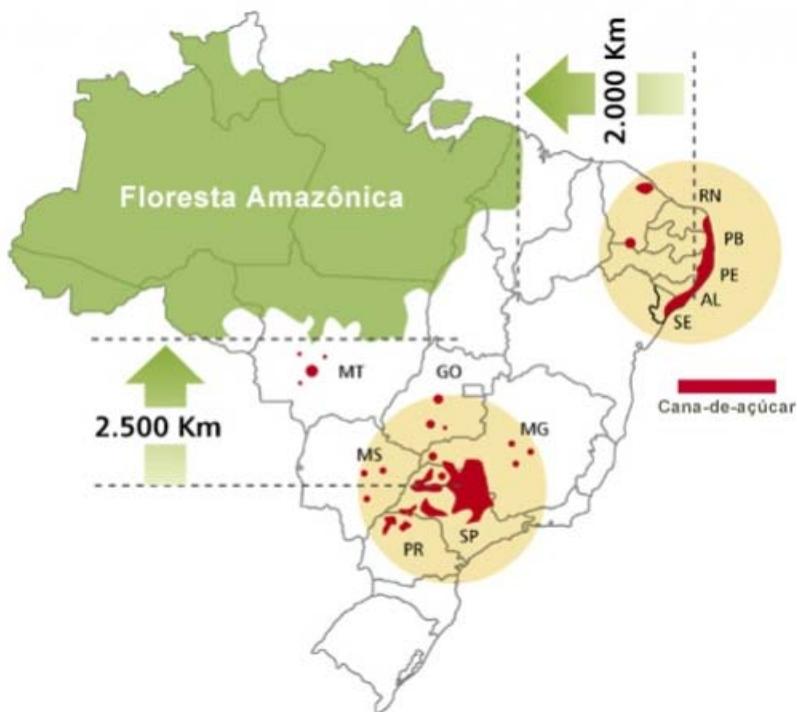


Figura 2.4 – Mapa de distribuição da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: (UNICA, 2014e)

2.2.2. Bagaço da Cana-de-Açúcar

Os principais subprodutos da indústria sucroalcooleira são folhas, pontas, palha, bagaço, torta de filtro, melaço, leveduras, vinhaça (também chamada de vinhoto ou restilo) e água de lavagem (CORTEZ et al., 1992). Cada tonelada de cana moída na fabricação de açúcar e etanol gera, em média, 250 kg de bagaço e 200 kg de palha e pontas (UNICA, 2014c).

O bagaço pode ser empregado como combustível na produção de energia (eletricidade e vapor), hidrólise (rações, furfural, lignina), polpa de papel, aglomerados e celulose. As folhas e pontas podem ser utilizadas como forragem. A vinhaça pode ser utilizada como fertilizante na adubação dos canaviais. A torta de filtro (subproduto do processo de clarificação do caldo na fabricação de açúcar) e a levedura (obtida depois da fermentação do caldo) podem também ser empregadas na adubação (CORTEZ et al., 1992).

De acordo com o MMA (2012), o bagaço de cana-de-açúcar, gerado durante o processo de extração do caldo nas usinas, é o maior resíduo agrosilvopastoril com potencial energético brasileiro, com uma produção cerca de 200 milhões de toneladas em 2009, representando aproximadamente 70% do total destes resíduos.

A eletricidade gerada através da queima do bagaço e da palha da cana-de-açúcar é uma energia limpa e renovável, chamada de bioeletricidade. A bioeletricidade é feita a partir da biomassa, não só destes resíduos, mas também de restos de madeira, carvão vegetal, casca de arroz, capim-elefante, entre outros. Com alto teor de fibras, o bagaço de cana, desde a revolução industrial, tem sido empregado na produção de vapor e energia elétrica para a fabricação de açúcar e etanol, garantindo a autossuficiência energética das usinas durante o período da safra (ÚNICA, 2014a).

De acordo com Cordeiro (2006), a constituição química do bagaço é função do tipo de cana-de-açúcar cultivada, tipos de fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais (clima, solo e água). A Tabela 2.3 apresenta a composição química elementar orgânica, baseada nos compostos carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio do bagaço da cana-de-açúcar seco ($100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24 horas). Este bagaço foi coletado em uma usina no município de São João da Barra – RJ.

Tabela 2.3 – Composição química elementar orgânica (CHN) do bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, 2006)

Elemento	Quantidade (%, em massa)
	Bagaço da cana-de-açúcar
Carbono (C)	43,1
Hidrogênio (H2)	6,2
Nitrogênio (N2)	0,4
Oxigênio (O2)	49,0
Cinzas	1,3

A Figura 2.5, apresentada por Cordeiro (2006), mostra o bagaço de cana-de-açúcar e detalhes da sua estrutura fibrosa. A imagem 2.5 (b) foi obtida por microscopia eletrônica de varredura com detecção por elétrons retrospalhados com aumento de 80 vezes.

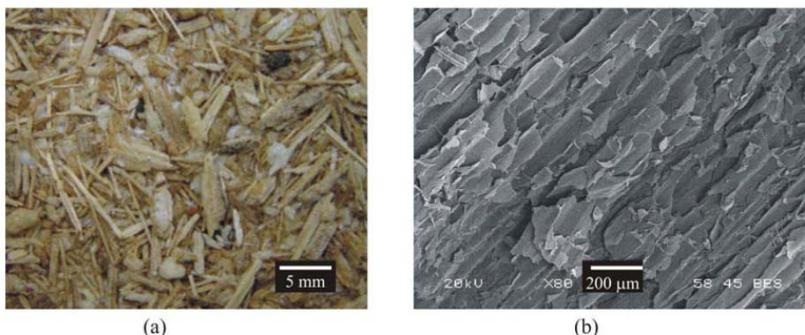


Figura 2.5 – Bagaço de cana-de-açúcar em fotografia (a) e micrografia que evidencia sua estrutura fibrosa (b) - (CORDEIRO, 2006)

2.2.3. Cinza Residuais do Bagaço da Cana-de-Açúcar

O bagaço da cana-de-açúcar é um subproduto da moagem da cana-de-açúcar para a extração do caldo, sendo este normalmente queimado como combustível em caldeiras que geram o vapor d'água utilizado na produção de açúcar e álcool e em processos de cogeração de energia, o que gera a cinza residuais do bagaço da cana-de-açúcar (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009a).

Cerca de 95% de todo o bagaço de cana-de-açúcar produzido no Brasil é queimado em caldeiras para a produção de energia. Nas usinas, a produção de energia faz parte do processo de autossuficiência elétrica. Para cada tonelada de bagaço que alimenta o processo de cogeração, aproximadamente 24 kg (2,4%) de cinza residual são geradas (FIESP/CIESP, 2001). Com uma produção brasileira de bagaço da cana-de-açúcar de aproximadamente 200 milhões de toneladas ao ano, gera-se em torno de 4,8 milhões de toneladas de cinzas residuais.

De acordo com Cordeiro (2006), as cinzas residuais são geradas com diferentes colorações em função da temperatura no interior da caldeira (600°C – 800°C) e do tempo de exposição ao calor. A cor é o indicativo do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e, conseqüentemente, do seu teor de carbono. Na Figura 2.6 podem ser vistas as cinzas com cores distintas, produzidas nas caldeiras, além do bagaço de cana in natura (Figura 2.6a). A cinza preta é proveniente de um processo de combustão incompleto (Figura 2.6b). Com maior temperatura e/ou tempo de exposição ao calor, maior quantidade de carbono é liberado e a cinza adquire cor que varia entre tons de vermelhos (Figura 2.6c) a branco (Figura 2.6d).



Figura 2.6 – Bagaço de cana-de-açúcar e diferentes cinzas residuais geradas após queima do bagaço em caldeira (CORDEIRO, 2006)

Cordeiro (2006) ainda descreve que a cinza residual do bagaço da cana, após classificação (passagem da cinza pela peneira de malha 425 μm para homogeneizar o material e eliminar aglomerações maiores de partículas) contém partículas com tamanho e forma variados, como pode ser observado na Figura 2.7. As Figuras 2.7a e 2.7b apresentam imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura com detecção por elétrons retroespalhados com aumento de 60 e 100 vezes, respectivamente. A Figura 2.7b permite a visualização de partículas de quartzo presentes na cinza.

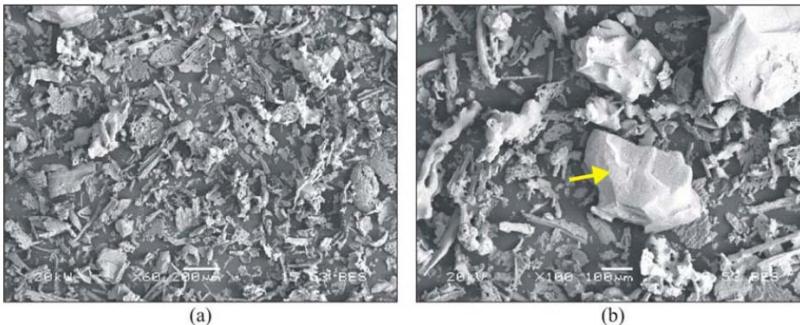


Figura 2.7 – Morfologia das partículas da cinza residual do bagaço de cana e detalhe da presença de partícula de quartzo na cinza (CORDEIRO, 2006)

É comum a prática de eliminação de cinzas residuais nas plantações de cana-de-açúcar como fertilizante. Antes de ser usada como fertilizante, a cinza deve ser testada para toxicidade, conforme descreve a Resolução CONAMA 313 (2002), com base na norma NBR

10004 (2004), que descreve a Classificação de Resíduos Sólidos (SALES; LIMA, 2010).

Com a finalidade de dar um destino adequado para a cinza residual, vários estudos de aproveitamento destes resíduos estão sendo realizados. Segundo Cordeiro (2006), estudos sobre o emprego da cinza residual do bagaço como adição mineral são realizados, mas ainda é incipiente.

A CBC utilizada como pozolana para substituição parcial do clínquer na produção de cimento ajuda na redução de emissões de CO₂ na atmosfera. Com isso, tal prática possui grande potencial para emissão de Certificados de Créditos de Carbono (FAIRBAIRN et al., 2010).

2.2.4. Aplicações da Cinza Residual do Bagaço da Cana-de-açúcar

A indústria cimenteira mundial é responsável pela emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de clínquer produzido, além de outros gases intensificadores do efeito estufa, como CO, CH₄, NO_x, NO₂ e SO₂, em proporções menores (MEHTA, 2002). Estima-se que cerca de 7% de todo CO₂ antrópico emitido no mundo é devido à produção de cimento Portland, o que representa aproximadamente 1,4 bilhões de toneladas por ano (MALHOTRA, 2002).

O CO₂ emitido pela indústria do cimento Portland é liberado durante a calcinação do calcário e queima de combustíveis fósseis utilizados no processo de fabricação do clínquer. Nos últimos anos tem aumentado muito o número de estudos visando redução da produção de clínquer pela indústria cimenteira, ou mesmo substituição parcial do cimento por materiais cimentícios e/ou pozolânicos no concreto. Várias adições minerais são empregadas atualmente, dentre as quais se destacam a cinza volante, a escória de alto-forno, a sílica ativa, a metacaulinita e a cinza da casca de arroz. Na grande maioria, estes materiais são resíduos de processos industriais ou agroindustriais. A transformação de resíduos em produtos para a indústria do concreto pode reduzir despesas e mitigar o impacto ambiental relativo à disposição e à extração de matérias primas para a produção de clínquer. Além dos aspectos econômicos e ambientais existem, ainda, as vantagens técnicas conseguidas através da incorporação de materiais pozolânicos ao concreto (CORDEIRO, 2006).

A substituição de cimento por cinzas, como as da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar, apresenta efeitos físicos e pozolânicos no desempenho de concretos, argamassas e pastas de cimento. O efeito físico reflete a influência destes materiais no empacotamento da mistura,

preenchendo os vazios entre as partículas de cimento por serem materiais muito finos ($D_{50} < 10 \mu\text{m}$) e, conseqüentemente, aumentando a compacidade da mistura (Figura 2.8). Por outro lado, apresenta o efeito pozolânico que é associado à quantidade de compostos silicosos e/ou aluminosos amorfos que estes materiais podem fornecer para que ocorram as reações com o hidróxido de cálcio na presença de água (SOUZA, 2011).

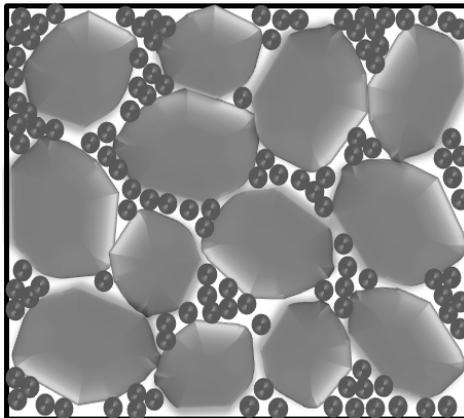


Figura 2.8 – Efeito físico da adição de pozolanas: grãos maiores representam o cimento e os grãos menores a pozolana (SOUZA, 2011)

As adições minerais podem resultar em variações do grau de hidratação, da quantidade de água ligada e da evolução do calor de hidratação total. Três efeitos físicos podem ser observados na hidratação do cimento com adições minerais em sua composição: o efeito de diluição do cimento Portland, equivalente ao aumento da relação água/cimento, inversamente proporcional à taxa de substituição; o efeito da distribuição granulométrica, ou efeito filer, que depende da granulometria e da quantidade de adição mineral, estando relacionado com a modificação da porosidade da mistura; e o efeito de nucleação, que é um processo físico conduzido pela ativação química da hidratação do cimento que catalisa a nucleação dos hidratos, reduzindo a barreira de energia (P. LAWRENCE; M. CYR; E. RINGOT, 2003).

No trabalho feito por Hernández, Middendorf e Gehrke (1998), pastas de cinza do bagaço de cana-de-açúcar com hidróxido de cálcio foram analisadas. A difração de raios-X indicou a presença de quartzo e cristobalita provenientes da cinza. Com a análise das imagens, os autores descreveram o produto principal, C-S-H, como de morfologia

acicular que irradiavam dos grãos ricos em sílica. Os autores ressaltaram que a alta temperatura (aproximadamente 700°C) e a combustão incompleta nas caldeiras reduzem a reatividade da cinza em função do elevado teor de carbono e da presença da sílica em estado estrutural cristalino. Quanto à velocidade de reação entre a alumina e o hidróxido de cálcio na presença de água, observou-se que, mesmo após 28 dias, as pastas ainda continham hidróxido de cálcio não reagido.

Payá et al. (2002) estudaram a reatividade de uma cinza residual de bagaço de cana-de-açúcar coletada em usina e peneirada (45 µm) e de outra queimada em laboratório, a 600°C, produzindo pastas com hidróxido de cálcio e, por meio de análise térmica, quantificaram hidróxido de cálcio não reagido. Como resultado, ambas as cinzas apresentaram elevada atividade pozolânica. Com 56 dias de cura, foram identificados picos relacionados à desidratação não só do C-S-H, mas também aos C-A-S-H e C-A-H, na curva diferencial termogravimétrica, indicando a formação destes compostos.

Segundo Cordeiro (2006), estudos realizados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar indicam seu emprego adequado como aditivo mineral, devido à sua composição química, principalmente referindo-se aos teores de dióxido de silício e perda ao fogo. Porém, a distribuição granulométrica variável da cinza aponta para a necessidade de moagem para aumento de sua reatividade, aumentando a superfície específica das partículas e conferindo maior homogeneidade.

A falta de padronização da geração das cinzas residuais está ligada ao processo de queima do bagaço nos diferentes tipos de caldeiras existentes nas usinas. A queima do bagaço com temperatura controlada, aliada a um processo de requeima de resíduos que passarem pelas caldeiras sem sofrerem queima total, proporcionariam cinzas residuais de melhor qualidade para utilização em misturas de concreto. Porém, tal padronização das usinas acarretaria em grandes investimentos, tornando obsoletas suas atuais instalações. No entanto, a montagem de novas usinas dentro dos padrões necessários recomendados seria perfeitamente possível, através da adaptação dos projetos dos equipamentos pelas empresas fornecedoras.

Para utilização das cinzas residuais em estudos de adição em misturas de concreto, ocorre então a necessidade de melhorar ou padronizar as suas características em laboratório, através de processos de peneiramento, requeima e/ou moagem. Na condição de material cimentício suplementar (MCS), muitas questões de pesquisas ainda estão em aberto sobre a contribuição da cinza residual na matriz cimentícia, que podem estar vinculadas à deficiência nos métodos

estruturados como norma, que não elucidam o papel desta cinza residual na hidratação da matriz cimentícia.

2.2.4.1. Utilização da Cinza Residual em Argamassas e Concretos

Várias são as pesquisas realizadas relativas ao emprego da cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar como adição aos concretos e argamassas de cimento, indicando benefícios na reologia, nas propriedades mecânicas, na durabilidade, entre outros. Algumas destas pesquisas realizadas nos últimos anos estão sintetizadas, na Tabela 2.4. Na tabela 2.4, de forma resumida para cada pesquisa, são apresentados os tipos de tratamento da cinza residual, sua aplicação em misturas cimentícias e os principais resultados obtidos.

Tabela 2.4 – Pesquisas realizadas sobre a utilização de cinzas residuais em misturas de concretos e argamassas em substituição do cimento

Referência	Tratamentos da cinza residual	Aplicações	Principais Resultados
Singh N. B., Singh V. D. e Rai (2000)	ACBC em estado natural.	Pastas com substituição de parte do cimento (10, 20 e 30%) e a/c=0,5.	A ACBC agiu como material pozolânico com menor grau de hidratação do cimento. Apresentou redução da permeabilidade. A mistura com 10% de ACBC atingiu uma resistência à compressão 30% maior aos 28 dias.
Payá et al. (2002)	ACBC em estado natural, sendo mistura da queima de bagaço e carvão.	Monitoramento do hidróxido de cálcio por termogravimetria em pastas de cimento e cal.	ACBC com elevada atividade pozolânica, tanto com cimento Portland quanto com a cal, apesar do alto teor de carbono (>10%) e arranjo estrutural cristalino.
Cordeiro (2006)	Bagaço queimado em temperaturas diferentes, variando entre 400 e 900°C e patamares de 3h e 6h e diversas configurações de moagem.	Substituição de até 40% da massa de cimento Portland em concretos convencionais e de alto desempenho.	A melhor queima foi a de 2 patamares (350°C e 600°C) apresentando menor teor de carbono, sendo que a temperatura de 600°C gerou CBC mais reativa. Estudo com moagem resultou em maior atividade para CBC com valores de superfícies específicas maiores.

De Paula et al. (2009)	Bagaço queimado por 6h a 600°C e ACBC requeimada por 3h a 700°C, passando ainda por moagem.	Adição em argamassa em substituição parcial do cimento.	Aumento da reatividade proporcionalmente ao aumento da superfície específica da CBC. Presença de sílica na fase amorfa e fases cristalinas. Retardo no intervalo dos tempos de pega. Argamassas com maior teor de CBC tenderam a ser mais porosas. Substituição de até 20% do cimento não prejudicou a resistência à compressão.
Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009)	Diversas configurações mecânicas de moagem.	Concreto de alto desempenho com substituição parcial do cimento.	Moagem de até 80% do total da cinza para tamanho máximo de aproximadamente 60 µm e área de superfície específica acima de 300 m ² /kg resulta em CBC com propriedades pozolânicas. Até 20% de substituição resultou em melhorias na reologia e resistência à penetração de íons de cloreto.
Rukzon e Chindapasirt (2012)	CBC moída em moinho de rolos e peneirada em abertura de 45 µm.	Substituição de 10, 20 e 30% do cimento em misturas de concreto.	A incorporação de até 30% de CBC diminui a penetração de cloreto e aumentou a resistência à compressão em até 5%.

Frías, Villar e Savastano (2011)	ACBC em seu estado natural e CBC pela queima do bagaço em 2 patamares: 400°C por 20 min mais 800°C por 60min. Seleccionadas partículas inferiores a 90µm.	Desempenho por análises químicas e físicas.	A temperatura de calcinação tem influência direta na morfologia. A quantidade de quartzo da ACBC coletada na usina é muito maior, devido a contaminação do solo no bagaço durante o processo da colheita. A CBC obtida em laboratório é excelente material pozolânico, enquanto que a ACBC coletada na usina não.
Bahurudeen et al. (2015)	Remoção de partículas fibrosas ricas em carbono por peneiramento com abertura de 300 µm e moagem em moinho de bolas até finura de 300 m ² /kg.	Mistura com cimento na proporção de 5, 10, 15, 20 e 25% para produção de concretos.	Substituição de até 25% apresentaram resistência à compressão igual ou ligeiramente melhor. Menor calor de hidratação para substituições de 10 e 20% estudadas. Aumento de resistência à penetração de cloretos e gases e diminuição de absorção de água. Semelhante retração durante endurecimento. Aumento de resistência à penetração de íons de cloreto devido ao desempenho pozolânico.

2.2.4.2. Utilização da Cinza Residual como Agregado Miúdo

Da mesma forma, algumas pesquisas foram realizadas com o objetivo de caracterizar o comportamento de misturas de materiais cimentícios com a cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial ou total da areia (agregados miúdos). A Tabela 2.5 sintetiza o tipo de tratamento empregado na cinza residual, sua aplicação em misturas e principais resultados obtidos.

Tabela 2.5 – Pesquisas realizadas sobre a utilização de cinzas residuais em substituição de agregados miúdos em misturas de concretos e argamassas

Referência	Tratamento da cinza residual	Aplicação	Principais Resultados
Martins e Zanella (2009)	Utilização de ACBC retida nas peneiras de abertura de 0,3 mm e 0,15 mm.	Argamassas com substituição de 30, 50 e 100% dos agregados miúdos.	Melhores resultados de absorção de água por capilaridade, quanto maior a porcentagem de ACBC utilizada devido ao provável efeito fíler.
Macedo (2009)	Moagem em moinho de bolas por 20 min.	Concretos com substituição de 3, 5, 8 e 10% dos agregados miúdos.	Redução da absorção de água por capilaridade devido ao efeito fíler de preenchimento dos vazios.
Souto (2010)	Peneiramento da ACBC em estado natural.	Substituição de 5 a 30% dos agregados miúdos em concretos.	ACBC com baixo potencial pozolânico. Maior resistência à compressão com 15% de ACBC e diâmetro máximo de 0,15mm. Provável efeito fíler.
Bessa (2011)	ACBC em estado natural.	Substituição de 30 e 50% dos agregados miúdos em misturas de concreto para produção de guias de vias urbanas.	A substituição não afeta a vida útil dos artefatos de concreto. Pequeno ganho econômico em relação ao concreto convencional e melhor desempenho mecânico. A ACBC não possuía pozolanicidade e sua utilização não afetou a alcalinidade da matriz cimentícia.

Sales e Lima (2010)	ACBC em estado natural provenientes de 3 diferentes usinas.	Produção de concretos com diferentes cimentos (CP V ARI, CP III 40 RS e CP II E 32). Substituição parcial de areia natural por 0, 15, 20, 30, 50 e 100% de CBC.	Uma amostra apresentou elevada perda ao fogo e teor de carbono. As outras duas apresentaram propriedades físicas similares aos da areia fina. A difração por raio x mostrou ser um material inerte. Amostras de concreto com 20 e 30% de ACBC apresentaram resistências à compressão maiores em relação ao concreto de referência.
Rêgo, Cavalcanti e Pereira (2012)	ACBC em estado natural.	Substituição de 25, 50 e 75% dos agregados miúdos em concretos.	Ganho de até 10% na resistência à compressão. Concreto mais poroso, com maior absorção de água. Concretos menos trabalháveis.
Agassi et al. (2012)	ACBC em estado natural.	Teores de substituição de até 50% da areia de concretos.	Aumento da resistência à compressão com até 25% de substituição. Menor profundidade de carbonatação com até 30% de substituição, redução de 65% a até 15% de substituição, com $a/c=0,57$.
Câmara et al. (2012)	ACBC de 3 usinas, em estado natural, peneirada em abertura de 0,18 mm.	Teores de substituição de 5, 10 e 20% da areia do concreto.	Resistência à compressão até 15% maiores para misturas com 5% de substituição.

Sampaio (2013)	ACBC em estado natural de 3 diferentes espécies de cana.	Teores de substituição de 10 a 20% da areia de concretos.	A variedade da cana influenciou no comportamento mecânico dos concretos com as diferentes ACBC. Houve redução de permeabilidade e aumento da resistência à compressão pelo provável efeito filer. Diminuição da trabalhabilidade devido à combustão incompleta.
Almeida et al. (2015)	Peneiramento em peneira com abertura de 4,75 mm e moídas em moinho pistilo almofariz por 3 min.	Substituição de 30 e 50% da areia em misturas de argamassas.	Até 50% de substituição não afetou a resistência nas argamassas com mesma consistência. A incorporação de ACBC pode reduzir a porosidade indicando possível efeito filer. As profundidades de carbonatação para substituição de 30% são estatisticamente equivalentes as argamassas de referência. Substituição superior a 30% pode levar ao aumento da frente de carbonatação. Substituições de 30% e 50% pode aumentar a resistência à penetração do cloreto.

Analisando os estudos apresentados, percebe-se dentre as diferentes aplicações que, para atingir melhores propriedades físicas e químicas para a utilização da cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de concreto e argamassa, há a necessidade de submetê-las a diferentes processos de tratamento, dentre eles a moagem, a queima controlada e o peneiramento.

Alguns autores tentaram padronizar o tratamento para alcançar melhores características proporcionadas pelas cinzas residuais. De acordo com Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), área de superfície específica acima de 300 m²/kg e moagem de até 80% da partículas com tamanho aproximado de 60 µm resulta em cinzas residuais com propriedades pozolânicas. Quanto a queima, Cordeiro (2006) conseguiu cinzas mais reativas com o processo de queima em dois patamares, o primeiro com 3h em 350°C seguido por mais 3h a 600°C. Já para peneiramento, Martins e Zanella (2009) e Souto (2010) conseguiram bons resultados, atribuídos ao efeito filer, utilizando cinzas residuais passantes pela peneira com 0,15 mm de abertura.

Independentemente do estudo, o beneficiamento prévio da ACBC é que pode propiciar propriedades pozolânicas ou que contribuam com o efeito filer. Porém, estes tratamentos demandam consumo maior de energia para seu beneficiamento, o que leva alguns pesquisadores a adotarem a ACBC como alternativa de substituição dos agregados miúdos, utilizando a ACBC como material inerte, com nenhum ou pouco processo de tratamento. Desta forma, a ACBC proporciona vantagens de utilização, talvez não como material pozolânico, mas por ser um material com grande proporção de finos e boas propriedades de empacotamento das partículas constituintes em misturas cimentícias.

Na presente pesquisa buscou-se avaliar misturas de concretos e argamassas com adição de ACBC, com três diferentes tratamentos, em substituição parcial dos agregados miúdos. Os tratamentos foram: moagem curta (moagem de 10 minutos em moinho de bolas); moagem longa (3 horas de moagem em moinho de bolas); e requeima (em forno mufla por 3 horas a 300°C mais 3 horas a 600°C). Os três tratamentos diferentes correspondem à níveis diferentes de tempo e energia empregados.

A moagem de 10 min é um processo simples, rápido e com baixo consumo de energia, que tem por finalidade a homogeneização do material. A moagem de 3 horas demanda tempo e consumo moderado de energia e tem a finalidade de proporcionar o refinamento das partículas para melhorar o efeito filer, quando adicionadas às misturas

cimentícias. Quanto à requeima, este é um processo que demanda mais tempo e consumo alto de energia e tem por finalidade proporcionar atividade pozolânica, diminuindo a quantidade de materiais orgânicos presentes nas cinzas residuais. A ACBC, nas condições diferentes de tratamentos, utilizada em misturas cimentícias propostas neste trabalho, levam às comparações das diferentes características proporcionadas, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, indicando a viabilidade, ou não, de aplicação.

Nas argamassas confeccionadas, substituiu-se 7,5% dos agregados miúdos (em massa) por ACBC, quantidade correspondente a parcela fina dos agregados, sendo as partículas passantes pela peneira com abertura de 150 μm . Já para as misturas de concretos, os agregados miúdos foram substituídos por ACBC na proporção (em massa) de 5, 10 e 20%.

Realizou-se o monitoramento do processo de endurecimento nas misturas com ACBC e sem ACBC (misturas de referência), fazendo leituras com diferentes métodos, inclusive com o de leituras de velocidade dos pulsos ultrassônicos, que se mostra vantajoso não só para monitoramento de propriedades do concreto endurecido, mas também para monitoramento da pega em argamassas e concretos frescos. Os resultados obtidos neste estudo, junto com análises físico-químicas, definem a ACBC com provável propriedade pozolânica e de efeito filler para misturas cimentícias.

2.3. MÉTODO DA VELOCIDADE DE PULSOS ULTRASSÔNICOS

Um dos objetivos deste trabalho foi estudar e avaliar o processo de endurecimento de concretos e argamassas, com substituição parcial do agregado miúdo por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, através de leituras de velocidades de pulsos ultrassônicos. Para isso, faz-se necessário conhecer o método, seu princípio de funcionamento, aplicações e comportamento da velocidade dos pulsos ultrassônicos durante o processo de hidratação do cimento.

As primeiras publicações sobre medições de pulsos gerados mecanicamente surgiram nos Estados Unidos, por volta de 1940 (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAN, 2006). Já nos anos 60, deu-se o desenvolvimento de equipamentos portáteis, como o PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester*), desenvolvido no início da década de 70. Esse equipamento é leve, com bateria própria e mostrador digital do tempo de propagação da onda ultrassônica (Figura

2.9), podendo ser utilizado em peças de concreto com espessura de até 20 metros, aproximadamente (MENEGETTI, 1999).

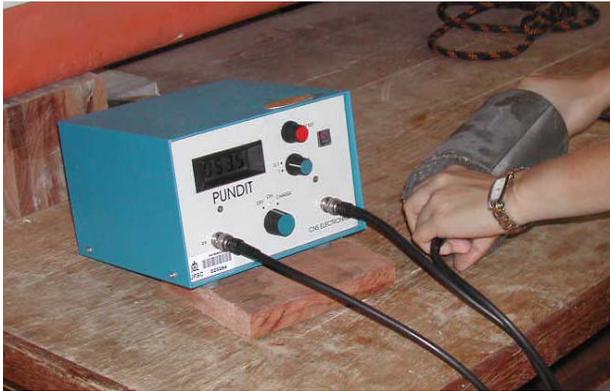


Figura 2.9 – Equipamento de Ultrassom (PUNDIT)

As ondas ultrassônicas possuem frequência entre 20kHz e 1.000MHz. As frequências das ondas audíveis (sônicas) estão entre 16Hz e 20kHz, enquanto as frequências das ondas subsônicas estão abaixo de 16Hz.

Os tipos de ondas são geralmente conhecidos como longitudinal (compressão) (Figura 2.10), transversal (cisalhamento) (Figura 2.11) e de superfície (*Rayleigh*) (Figura 2.12). Cada tipo de onda proporciona um movimento específico das partículas no concreto. As ondas longitudinais são aproximadamente duas vezes mais rápidas que os outros dois tipos, excitando as partículas na mesma direção em que as ondas se propagam. As ondas transversais têm as partículas movimentando-se perpendicularmente à direção de percurso da onda. As ondas de superfície têm percurso ao longo da superfície e têm as partículas movimentando-se elipticamente. Em geral, os transdutores são projetados para gerar ondas longitudinais, por serem mais rápidas (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAN, 2006).

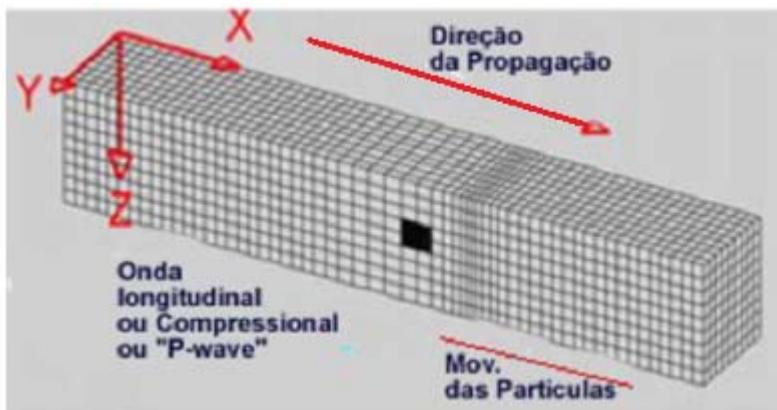


Figura 2.10 – Ondas longitudinais (compressão) (MIKULIC et al., 2005 adaptada por IRRIGARAY, 2012)

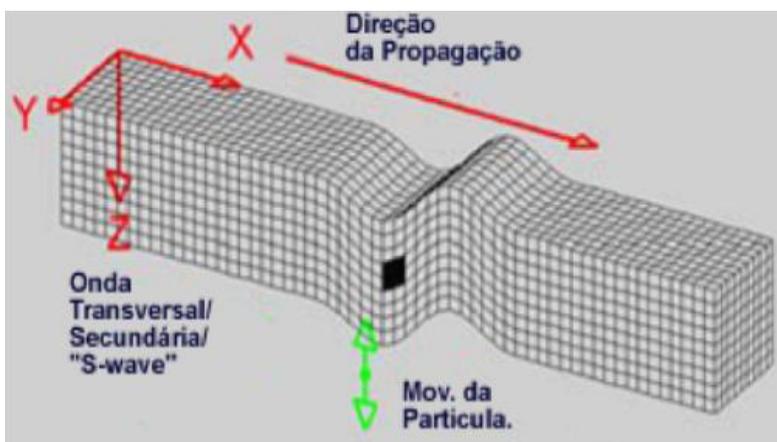


Figura 2.11 – Ondas transversais (cisalhamento) (MIKULIC et al., 2005 adaptada por IRRIGARAY, 2012)

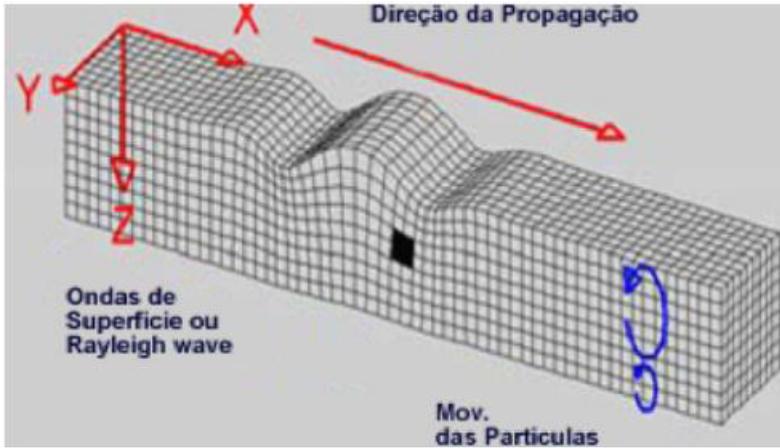


Figura 2.12 – Ondas de superfície (Rayleigh) (MIKULIC et al., 2005 adaptada por IRRIGARAY, 2012)

O método de ultrassom baseia-se no fato de que a velocidade (V) de propagação das ondas é influenciada pela densidade e propriedades elásticas do concreto. O ensaio consiste na medição do tempo (T) em que ondas ultrassônicas levam para atravessar determinada distância (L), entre o transmissor e receptor, no material (Figura 2.13). O comprimento percorrido é dividido pelo tempo, resultando na velocidade média de propagação, $V=L/T$ (MALHOTRA; CARINO, 2004).

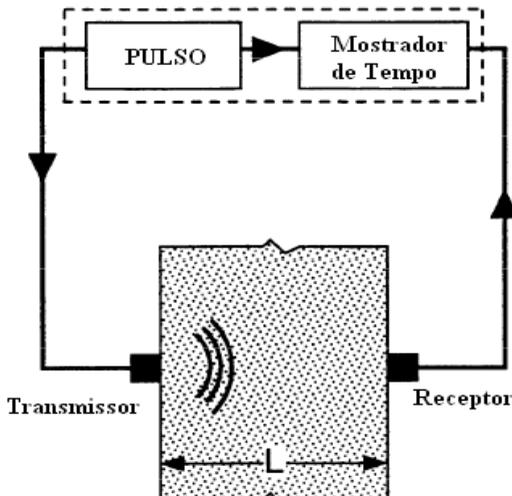


Figura 2.13 - Esquema de funcionamento do aparelho de ultrassom

A velocidade da onda ultrassônica longitudinal em um material sólido depende de sua densidade e de suas propriedades elásticas, como mostra a Equação 2.1 (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAN, 2006).

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad \text{Equação 2.1}$$

sendo:

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{Equação 2.2}$$

onde:

V = velocidade de propagação da onda (m/s)
 E_d = módulo de elasticidade dinâmico (kN/m²)
 ρ = massa específica (kg/m³)
 ν = coeficiente de Poisson dinâmico

Através da Equação 2.1, vê-se que a velocidade de propagação é diretamente proporcional a raiz quadrada do módulo dinâmico de elasticidade. Esta relação possibilita utilizar medições de velocidade para indiretamente avaliar a resistência à compressão.

O ensaio de ultrassom pode ser feito através de transmissões direta, indireta e semidireta, de acordo com as posições dos transdutores na superfície do concreto (Figura 2.14). As leituras, de acordo com a Equação 2.1, são influenciadas pelo coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade dinâmico e massa específica do concreto. No caso das leituras serem feitas em concreto armado, a presença de armaduras e vazios também podem influenciar nos resultados.

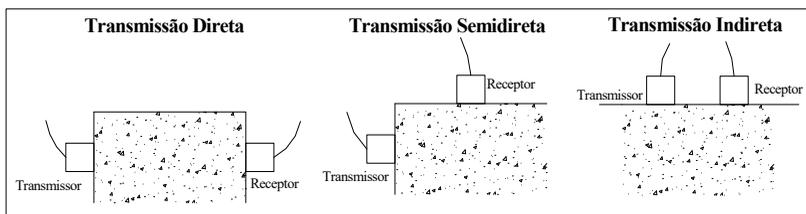


Figura 2.14 - Modos de transmissões das ondas ultrassônicas de acordo com a posição dos transdutores na superfície do concreto

Quanto à frequência dos transdutores, são usualmente empregados para ensaiar concretos transdutores com frequências entre

25 e 100kHz. Transdutores de alta frequência, acima de 100 kHz, são usados em amostras de pequenas dimensões, com comprimento relativamente pequeno ou para concretos de alta resistência. Transdutores de baixa frequência, abaixo de 25 kHz, são utilizados em amostras maiores ou com grande comprimento, ou em concretos com agregados graúdos de maiores dimensões (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Os transdutores mais comumente usados tem frequência 54 kHz, possuem superfície plana e diâmetro de 50 mm. Considerando-se que a grande maioria dos elementos estruturais possui face plana, esse tipo de transdutor possibilita bom contato com a superfície das peças a serem ensaiadas (IRRIGARAY, 2012).

O equipamento possibilita a transformação do pulso elétrico em onda de choque, numa faixa de 24 a 500 kHz. A largura mínima do elemento a ser ensaiado não deve ser menor que o comprimento de onda, que depende da frequência do transdutor utilizado e da velocidade (Equação 2.3). A dimensão máxima dos agregados graúdos também deve ser inferior ao comprimento de onda (λ) para evitar a redução de energia da onda ou perda de sinal (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAN, 2006).

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

Equação 2.3

onde:

λ = comprimento de onda

V = velocidade de propagação da onda

f = frequência de vibração

O equipamento de ultrassom é de fácil operação e custo pouco elevado, comparado a outros métodos de ensaios não destrutivos. Ele pode avaliar o concreto em todo o comprimento do elemento, se utilizada transmissão direta. O ensaio realizado é totalmente não destrutivo. Tem como pontos críticos o contato entre transdutores e superfície do concreto, assim como, a necessidade de experiência do operador para análise dos dados, pois estes podem ser de difícil interpretação (MALHOTRA; CARINO, 2004). A superfície do concreto deve ser lisa, permitindo o perfeito contato dos transdutores, e não deve possuir revestimento algum, que poderá ter propriedades diferentes das

do concreto. Pode ser utilizado como acoplante entre as faces dos transdutores e do material a ser ensaiado, graxas de silicone ou mineral e vaselina.

O método de ultrassom é padronizado pela Norma Americana ASTM C597 (2009) e a Norma Brasileira NBR 8802 (2013). A Norma Brasileira descreve como principais aplicações deste método, a verificação da homogeneidade do concreto, a detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições, e o monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico), principalmente pela ação de sulfatos.

Correlações para estimar a resistência do concreto podem ser obtidas, mas estas podem ser influenciadas pelo tipo de agregado, relação água/cimento, idade do concreto, dimensão e graduação dos agregados e cura (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAN, 2006). A correlação entre velocidade da onda e resistência do concreto poderá ser mal interpretada se no elemento existirem fissuras, vazios, entre outras descontinuidades. Deve-se também tomar cuidado quando leituras forem feitas em peças de concreto armado, devido a presença de armaduras que influenciam nos resultados.

O método da velocidade de pulsos ultrassônicos pode ser aplicado tanto em laboratório quanto em campo. Além disso, ele pode ser usado para o controle de qualidade, assim como na análise da deterioração da peça. Aplicações usuais incluem a avaliação da homogeneidade do concreto, estudo da hidratação, estimativa da resistência do concreto e estudos sobre a durabilidade do concreto (IRRIGARAY, 2012).

Segundo Pinto et al. (2004), o ensaio de ultrassom *in loco* apresenta o inconveniente de depender da desforma da estrutura, que poderá acontecer após vários dias da concretagem, impossibilitando estimar-se a resistência do concreto nas primeiras idades. Este inconveniente pode ser superado utilizando janelas com tampas removíveis na fôrma da estrutura a ser concretada, que podem ser abertas para a utilização do ultrassom e posteriormente fechadas, antes que ocorra a desforma da peça por inteiro.

A taxa de hidratação das pastas e, conseqüentemente a taxa de aumento de velocidade de pulsos ultrassônicos, além da relação água/cimento e da temperatura de cura, é influenciada pela composição química, finura, distribuição granulométrica e imperfeições estruturais dos compostos do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Grosse e Reinhardt (2001), o método do ultrassom também é adequado para verificação da influência de aditivos plastificantes, aceleradores, incorporadores de ar, no retardo ou aceleração da hidratação de pastas, argamassas e concretos.

O método é indicado para monitoramento de mudanças ocorridas durante as primeiras 36 horas após a adição da água à mistura do concreto. Uma aplicação deste método é a avaliação do tempo de pega para diferentes tipos de cimentos ou aditivos a serem usados em determinada mistura (MALHOTRA; CARINO, 2004).

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) em um material está relacionada com a sua microestrutura. A VPU está também relacionada com as ligações internas e módulo de elasticidade dos sólidos. Este método vem sendo usado, nos últimos anos, no monitoramento em tempo real nas primeiras idades de pastas de cimento, argamassas e concretos (IRRIGARAY, 2012). Com a hidratação do cimento, o volume e a área de contato das partículas de cimento aumentam, aumentando também a ligação entre as partículas sólidas, o que aumenta a VPU devido ao aumento dos caminhos para a propagação das ondas ultrassônicas (CHEN; SHUI; LI, 2010).

Em seu trabalho, Irrigaray (2012) descreve em sua conclusão que os resultados obtidos utilizando-se cimento CP V-ARI RS e CP IV-32 apresentaram-se bastante satisfatórios, evidenciando-se que o procedimento de empregar a velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos para monitoramento da pega é mais rápido e mais prático do que o ensaio em que se emprega o penetrômetro de Proctor.

Devido a esta rapidez e praticidade, o ultrassom foi utilizado nesta pesquisa, e ainda, através da comparação das leituras obtidas em diferentes misturas de concreto com CBC, pode-se evidenciar características proporcionadas pela cinza e assim agregar novos conhecimentos ao comportamento da evolução da hidratação do cimento em idades iniciais.

O desenvolvimento da microestrutura pela hidratação da pasta de cimento ao longo do tempo já é bastante conhecida. No entanto, o conhecimento sobre a evolução da pasta de cimento em idades iniciais é pouco em relação ao conhecimento já adquirido para maiores idades. O grau de hidratação do cimento Portland nas primeiras idades é o tema mais comumente abordado, sendo quantificado por meio de medições do calor de hidratação, teor de água não evaporável e quantidade de hidróxido de cálcio produzido pela hidratação de clínquer. No entanto, nenhum dos resultados obtidos por meio destas medições está diretamente relacionado com as mudanças físicas da pasta de cimento e

não podem ser utilizadas diretamente para avaliar a alteração das propriedades reológicas e de resistência (CHEN; SHUI; LI, 2010).

Ye et al. (2004) verificaram o desenvolvimento microestrutural de mistura de concreto através de leituras de velocidades ultrassônicas. Para isso, prismas de 15x15x20 cm foram utilizados e ensaiados em diferentes temperaturas de cura (10, 20, 30 e 40°C). A Figura 2.15 mostra os resultados, relacionando tempo e VPU ao longo de uma semana.

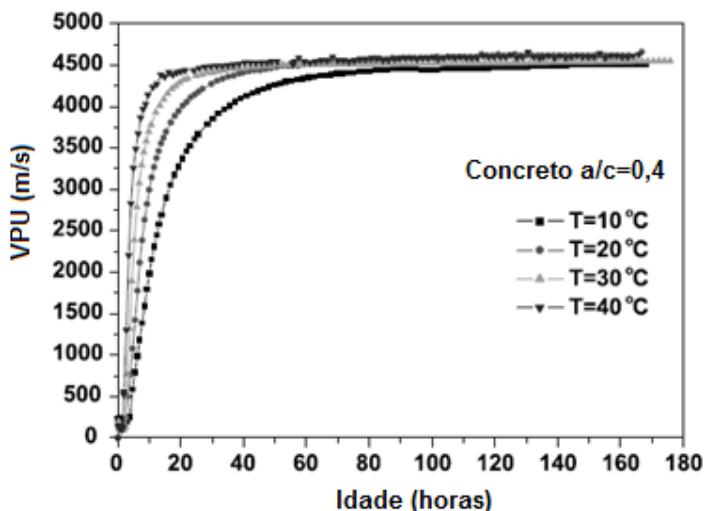


Figura 2.15 – Influência da temperatura e idade de cura na VPU (YE et al., 2004)

Com base na análise dos dados experimentais, Ye et al. (2004) simplificam a evolução da VPU em três estágios característicos, como mostra a figura 2.16.

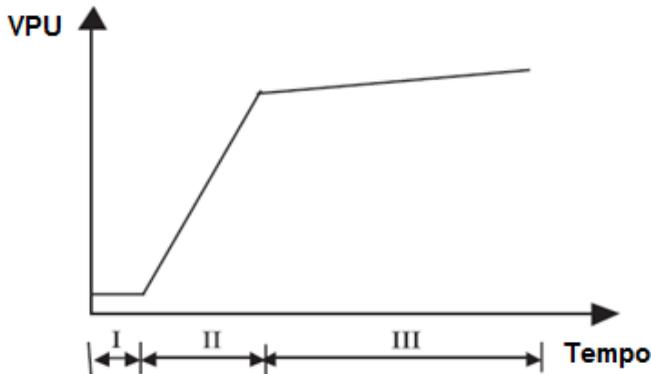


Figura 2.16 – Simplificação da evolução de VPU em três estágios característicos (YE et al., 2004)

No primeiro estágio, a VPU permanece constante em um valor muito baixo. Este período pode ser relacionado com a fase dormente da hidratação do cimento, e sua duração depende da temperatura de cura. No início deste período, as partículas de cimento não hidratadas são distribuídas aleatoriamente (Figura 2.17). O sinal do ultrassom é fortemente atenuado pela grande quantidade de pequenas bolhas de ar nas misturas frescas. Levando-se em consideração a influência das bolhas de ar, a velocidade dos pulsos ultrassônicos será de aproximadamente 200 m/s, em um concreto fresco com 1 a 2% de ar. No final deste período, as pequenas partículas de cimento são dissolvidas e incorporadas na camada externa das partículas maiores, formando pequenos grupos isolados de substância sólida. Estes pequenos núcleos isolados são a base da formação de toda a rede sólida que se desenvolve até interligarem-se ao longo de todo o material, formando um caminho sólido pelo qual as ondas podem propagar-se, ao invés de se propagar através da fase líquida, levando a um acentuado aumento da VPU (Figura 2.18).

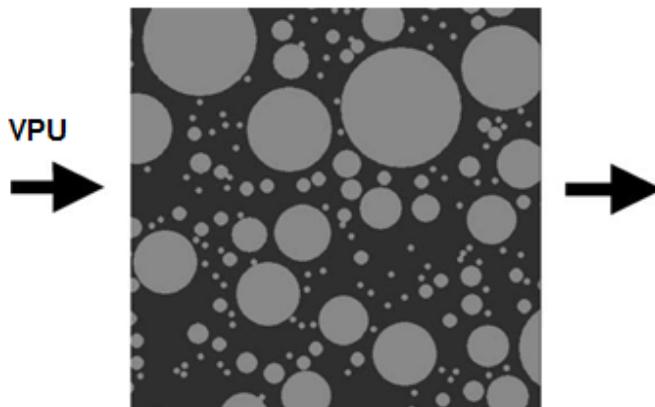


Figura 2.17 – Estágio inicial de suspensão das partículas de cimento (YE et al., 2004)

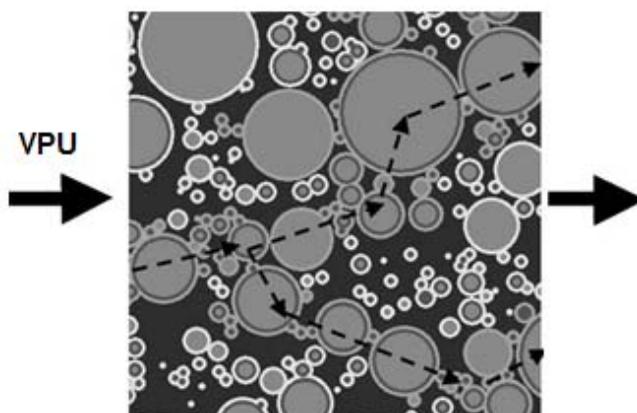


Figura 2.18 – Caminho sólido de percolação (YE et al., 2004)

No segundo estágio há a continuidade da conectividade da fase sólida, aumentando rapidamente a VPU após o período de dormência. Este período pode durar de 10 a 60 horas, dependendo da temperatura de cura e tipo de cimento, o que influencia na taxa de hidratação (YE et al., 2004).

No terceiro estágio, a fração total do volume de sólidos aumenta, ocorrendo leve aumento da VPU, indicando que todas as partículas da hidratação do cimento estão interligadas (Figura 2.19), formando uma estrutura sólida totalmente conectada (YE et al., 2004).

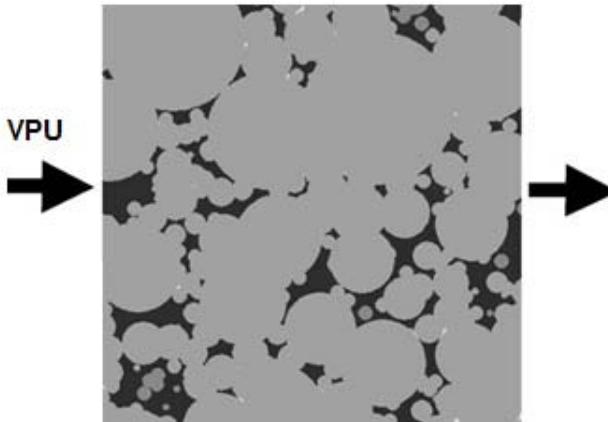


Figura 2.19 – Fase sólida totalmente conectada (YE et al., 2004)

Mikulic et al. (2005) utilizaram o método do ultrassom para estudar as características de endurecimento em duas misturas de concreto, uma sem aditivos e outra com aditivo retardador de pega. Para isso, foram preparados prismas de concreto de $10 \times 10 \times 30$ cm. Simultaneamente com as medições de VPU, ensaios de tempo de pega foram realizados por meio de penetrômetro. Após a mistura, nas primeiras duas horas o concreto fresco contém muitas bolhas de ar, nele introduzidos durante o processo de mistura, resultando em VPU baixa e constante, com velocidade um pouco acima do que leituras obtidas no ar. Naturalmente o ar mistura-se com a água e as bolhas formadas, por serem instáveis, agrupando-se em bolhas de maiores dimensões que acabam escapando pela superfície da mistura. Como o teor de ar vai diminuindo, a velocidade aumentou para aproximadamente 1500 m/s, que corresponde à VPU na água. Com o desenvolvimento do processo de hidratação, o concreto perde água e a velocidade da onda aumenta lentamente (Figura 2.20 e 2.21).

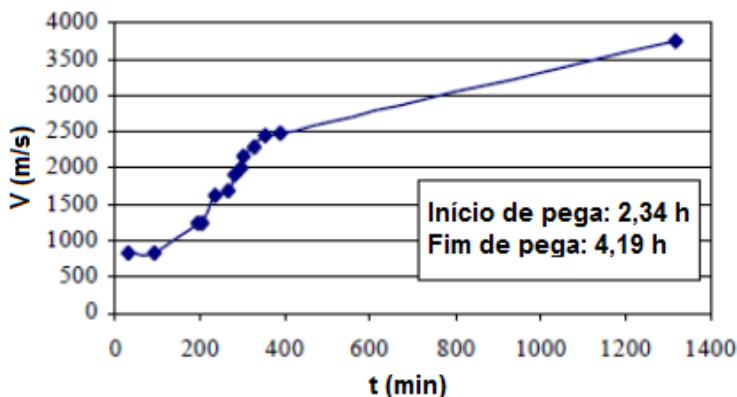


Figura 2.20 – VPU ao longo do tempo: Concreto sem aditivos (MIKULIC et al., 2005)

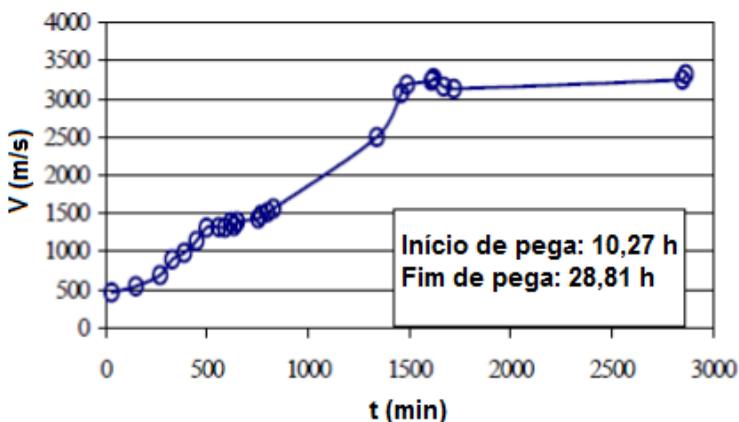


Figura 2.21 – VPU ao longo do tempo: Concreto com aditivo retardador de pega (MIKULIC et al., 2005)

A velocidade do pulso ultrassônico em grande parte depende do processo de hidratação da pasta de cimento. A onda percorre mais rapidamente através dos vazios preenchidos com água do que através dos vazios com ar. Consequentemente, o teor de umidade afeta diretamente a velocidade do pulso ultrassônico. De certo modo, este é o ponto fraco dos testes com ultrassom para monitoramento do tempo de pega em concretos, pois, nessa fase, as partículas de cimento estão

isoladas umas das outras, enquanto os poros capilares com água estão conectados. No entanto, os resultados mostram que, durante o processo, a velocidade aumenta ao mesmo tempo em que ocorre a pega (MIKULIC et al., 2005).

Em seu trabalho, Chen, Shui e Li (2010) utilizaram três diferentes relações a/c, 0,35, 0,38 e 0,40, na preparação de pastas de cimento. Monitoraram todas as amostras pelo ensaio de ultrassom com leituras a cada 10 minutos. A Figura 2.22 apresenta as velocidades dos pulsos ultrassônicos nas pastas de cimento Portland em diferentes idades de hidratação. Nas idades iniciais da hidratação do cimento, a mudança da VPU sugere uma baixa taxa de hidratação. Após 100 minutos de hidratação, a VPU aumenta rapidamente e a taxa de hidratação acelera. Após 10 horas, a taxa de incremento VPU diminui e, gradualmente, estabiliza.

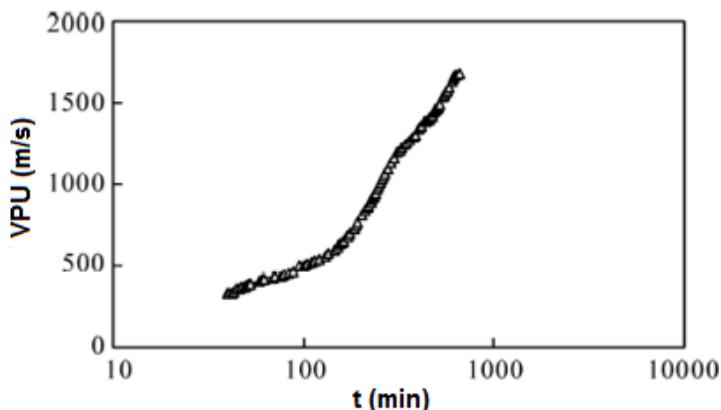


Figura 2.22 – Mudanças de VPU nas pastas de cimento Portland (CHEN; SHUI; LI, 2010)

Com os resultados de seus estudos, Chen, Shui e Li (2010) concluíram que o método do ultrassom é um método não destrutivo eficaz e preciso para monitoramento do processo de hidratação de pastas de cimento em idades iniciais. Também afirmam que o processo de hidratação nas primeiras idades pode ser classificado em quatro períodos: período de dormência, período de aceleração, período de desaceleração e período de estabilização.

Vicente, Prizskulnik e Kuperman (2010) caracterizaram, com o uso do ultrassom em pastas de cimento, o tempo de início de pega pela mudança brusca da curvatura VPU x tempo, ou seja, pelo rápido

crescimento da velocidade ultrassônica. Quanto ao tempo de fim de pega, caracterizaram como a diminuição do ritmo de crescimento da velocidade. Em seu estudo, compararam leituras de velocidade de pulsos ultrassônicos ao longo do tempo, com resultados de tempo de início e fim de pega com o uso do aparelho de Vicat, em pastas de cimento de consistência normal e uso de cimento CP II E 32. Os resultados podem ser vistos na Figura 2.23. Verifica-se que os tempos de início e fim de pega determinados pelo uso do aparelho de Vicat são compatíveis com os resultados obtidos nas curvas de velocidade ultrassônica.

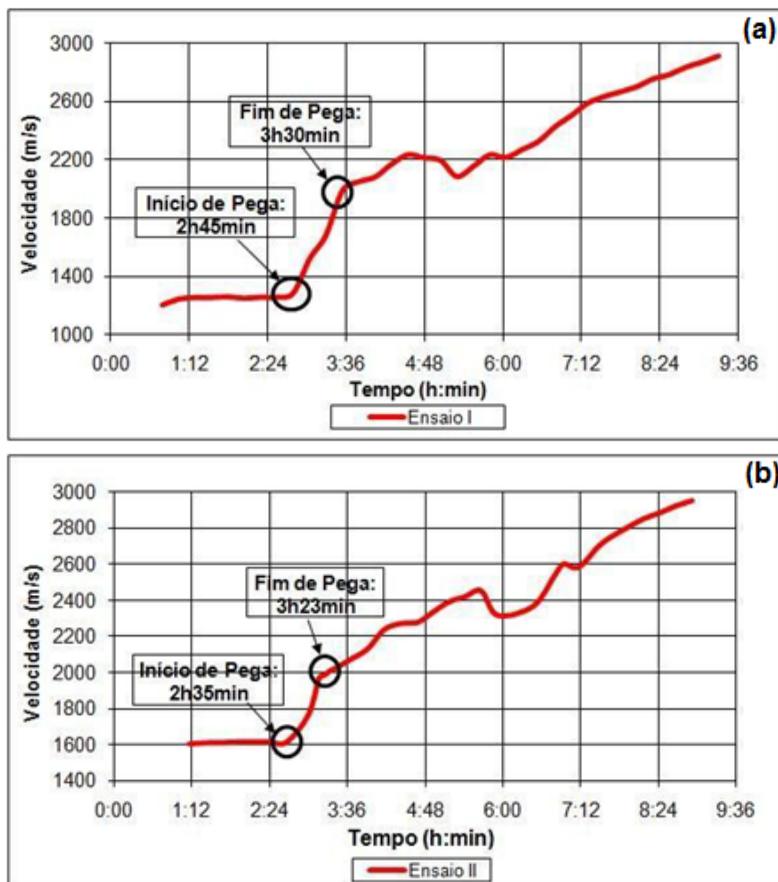


Figura 2.23 – Resultados dos ensaios I (a) e II (b) com o método do ultrassom e com aparelho de Vicat em pastas de cimento CP II (VICENTE; PRISZKULNIK; KUPERMAN, 2010)

Em seu estudo, Dongyu et al. (2012) concluíram que, com base na forma de onda, no espectro de frequência e parâmetros da onda recebidos pelo transdutor piezolétrico do ultrassom, o processo da reação de hidratação do cimento pode ser dividido em quatro períodos, sendo estes, período de indução, período de aceleração, período de atenuação e período estacionário. A Figura 2.24 apresenta a variação do pico da amplitude da onda ao longo do tempo, monitoradas durante o processo de hidratação de pastas de cimento de consistência normal.

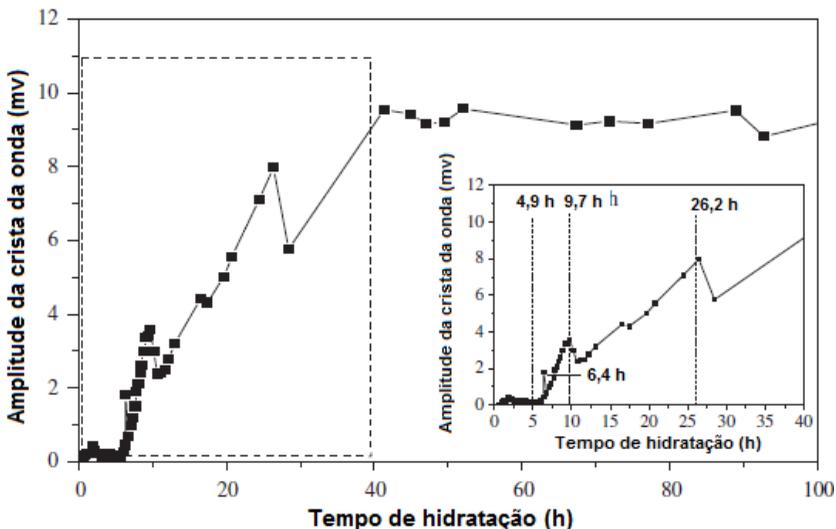


Figura 2.24 – Variação no pico da amplitude da onda no processo de hidratação do cimento (DONGYU et al., 2012)

Ainda de acordo com Dongyu et al. (2012), a Figura 2.25 representa o processo de hidratação do C_3S mineral nos diferentes períodos de reações de hidratação do cimento, o que explica a forma de alteração da frequência dominante das leituras das ondas.

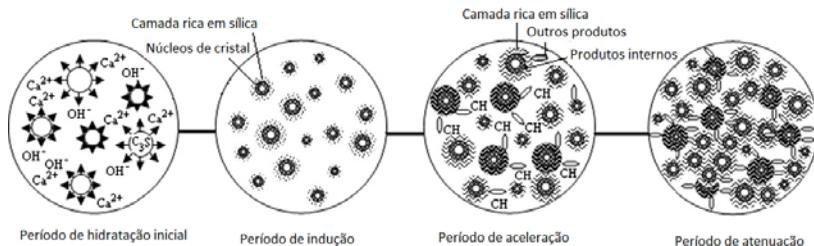


Figura 2.25 – Diagrama de reações de hidratação do cimento em diferentes períodos de hidratação (DONGYU et al., 2012)

De acordo com Silva et al. (2011), na curva velocidade em relação ao tempo (Figura 2.26) observam-se estágios distintos que podem ser associados aos da curva clássica de evolução da liberação de calor em relação ao tempo (Figura 2.27). A Figura 2.26 ilustra esses estágios através de uma curva típica da velocidade de propagação da onda ultrassônica em relação ao tempo decorrido desde a adição de água ao cimento. No início, a fase é caracterizada por uma velocidade baixa e praticamente constante, correspondente ao período de dormência. O término do primeiro estágio caracteriza-se por um aumento brusco na velocidade, onde ocorre a pega (transição do estado de suspensão para sólido), iniciando o segundo estágio, o de aceleração. O terceiro estágio caracteriza-se pelo crescimento com menor aceleração da velocidade, inclinando a curva mais para a direita. O último estágio, o chamado de estágio de estabilização, caracteriza-se por valores assintóticos, com aceleração nula ou quase nula, podendo ser desprezada.

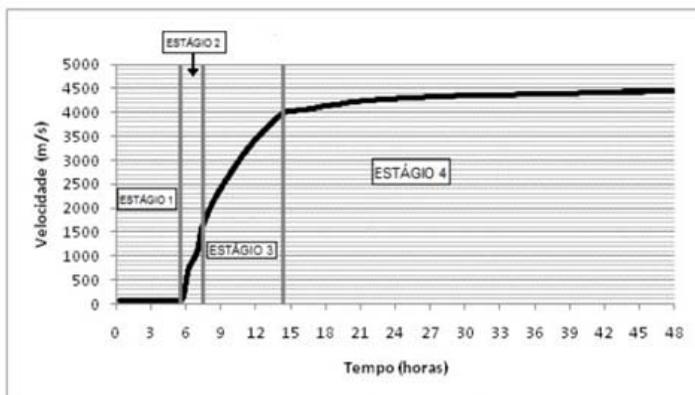


Figura 2.26 – Estágios da curva típica de velocidade de propagação da onda ultrassônica em relação ao tempo (SILVA et al., 2011)

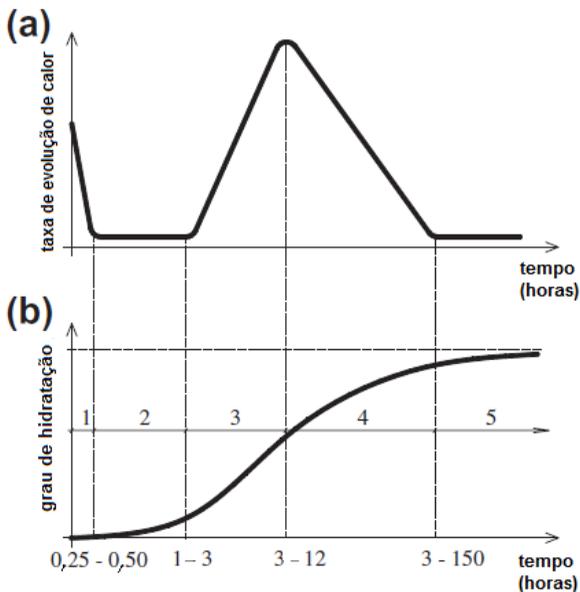


Figura 2.27 – Estágios do processo de hidratação do cimento: (a) taxa de evolução de calor, (b) grau de hidratação (Adaptado de TRTNIK e GAMS, 2014)

Em seu trabalho, Irrigaray (2012) considera que a VPU do concreto é dependente da proporção volumétrica e da VPU nos seus constituintes. Considera ainda que, a VPU nos agregados permanece inalterada durante o processo de hidratação e somente a pasta de cimento sofre alteração nas propriedades elásticas, conseqüentemente, na velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos. Para sua análise, utilizou misturas de concreto com três relações água/cimento, 0,48, 0,55 e 0,65, e com três teores de pasta, 28%, 32% e 36%. Utilizou-se os cimentos CP V-ARI-RS, agregados graúdos granitos e diabásicos, agregados miúdos de britagem e aditivo polifuncional. Em outras misturas utilizou-se o CP IV-32 e agregado granítico. A VPU e a resistência à compressão foram determinadas em diversas idades. Como resultado, conseguiu-se correlações entre resistência à compressão e VPU com elevados coeficientes de determinação (R^2), independente do tipo de agregado, tipo de cimento, teor de pasta e dimensão máxima característica. Empregando-se o procedimento proposto foi possível obter coeficientes de determinação (r^2) elevados entre a VPU na pasta e

a resistência à compressão do concreto, independente do tipo de agregado, tipo de cimento, teor de pasta e dimensão máxima característica.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste trabalho segue as seguintes etapas: caracterização dos materiais; definição dos tratamentos da areia com cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC); definição dos traços de concretos e argamassas com adição de ACBC; e análise da influência da presença de ACBC nas propriedades das misturas. As etapas do trabalho estão resumidas na figura 3.1.

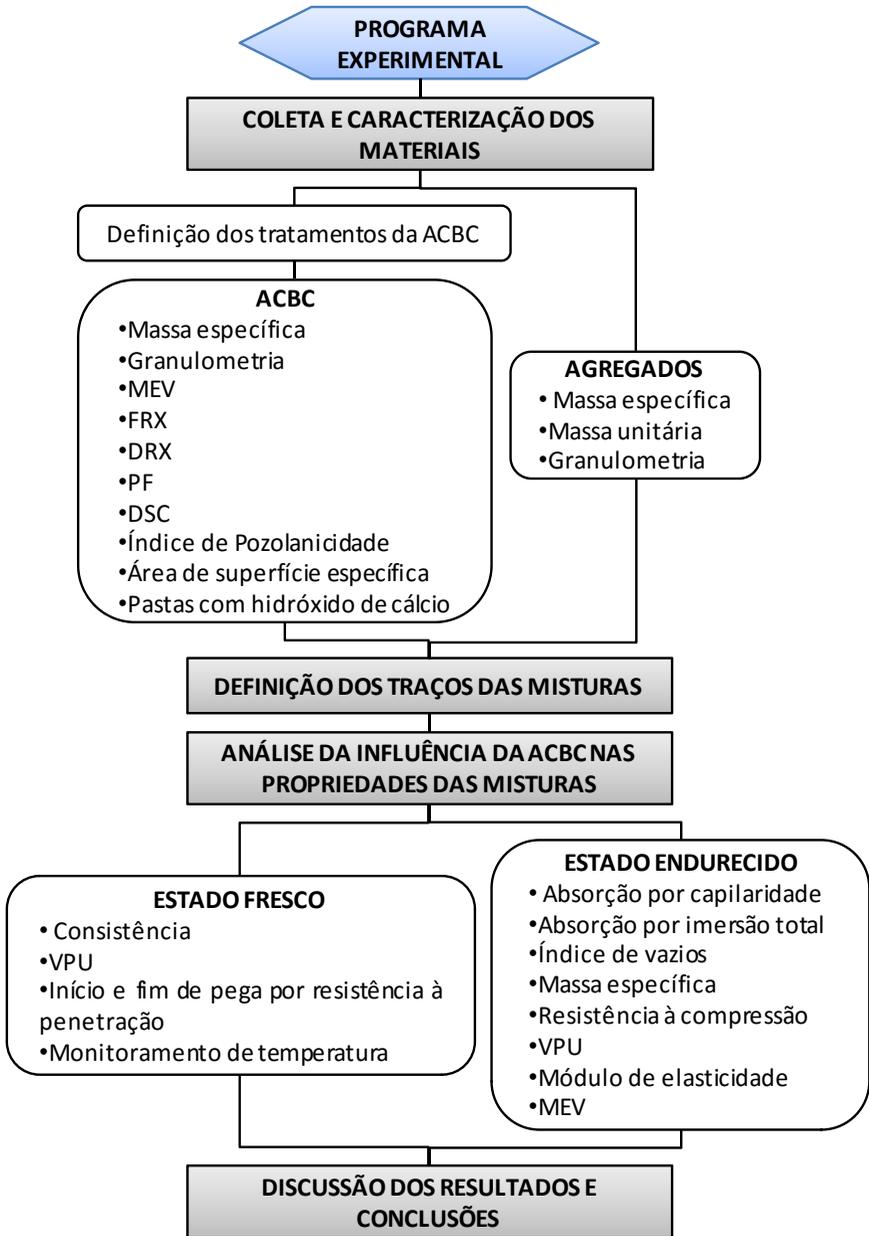


Figura 3.1 – Esquema das etapas que compõem o programa experimental

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Coleta da ACBC e Características da Usina

A usina sucroalcooleira escolhida para a coleta dos materiais está localizada na região Noroeste do Estado do Paraná, a uma distância de aproximadamente 60 km de Umuarama. Três usinas da região foram contatadas como possíveis escolhas, por ambas queimarem o bagaço da cana-de-açúcar para produção de energia e, conseqüentemente, gerando a ACBC como resíduo. A usina escolhida é bastante representativa, pois se trata de uma das maiores usinas sucroalcooleiras do Paraná (figura 3.2).



Figura 3.2 – Usina Sucroalcooleira escolhida para coleta dos materiais utilizados na pesquisa

Abaixo estão descritas algumas características e informações de produção da usina escolhida (dados cedidos pela usina):

- Capacidade de produção: 4.000.000 de toneladas de cana / safra;
- Geração de bagaço: 250 kg / tonelada de cana (bagaço com 50% de umidade);
- Geração de Resíduos (ACBC): 90 kg / tonelada de cana (sendo 90% sílica);
- Geração de vapor: 2,1 toneladas / tonelada de bagaço;
- Geração de Energia Elétrica: 147 kWh / tonelada de vapor (60 kWh / tonelada de cana);
- Consumo de Energia Elétrica: 20 kWh / tonelada de cana;
- Exportação de Energia: 40 kWh / tonelada de cana.

A usina utiliza o bagaço da cana-de-açúcar como combustível para a geração de vapor na caldeira. A caldeira, de acordo com informações cedidas pela própria usina, é do tipo monodrum, caracterizada por possuir um só tambor fora dos fluxos de gases. O evaporador está localizado em local independente do tambor, o que possibilita maior flexibilidade do arranjo das superfícies de troca de calor.

O bagaço utilizado é proveniente da moagem de cana-de-açúcar na própria usina. O valor do Poder Calorífico Inferior (PCI) deste combustível, comprovado através de ensaios realizados pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), de acordo com as informações cedidas pela usina, foi de 6,97 MJ/kg.

Como a usina possui capacidade de produção de 4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, de acordo com os dados fornecidos, ela tem capacidade de produção para cerca de 360.000 toneladas de ACBC por safra. Toda ACBC produzida é levada às lavouras das plantações de cana como forma de descarte deste resíduo.

No processo de produção da usina, a cana-de-açúcar é colhida, geralmente por máquinas adequadas, em plantações da região, e transportadas até o local. O processo é contínuo na usina, ou seja, na medida em que o caminhão descarrega a cana em uma esteira, esta é transportada até a moagem, sendo este processo e os seguintes, todos automatizados.

A cana-de-açúcar, quando descarregada na esteira, recebe lavagem por meio de gotejamento de água, com a finalidade de retirar o excesso de solo transportado junto com o produto. O excesso de solo é extremamente prejudicial aos equipamentos da usina, pois desgasta as superfícies metálicas, danificando-os. Paradas na produção durante o período de safra para substituição e reparos nas instalações acarretam em grandes prejuízos para as empresas. Mesmo com a lavagem da cana, pequenas quantidades de partículas de solo permanecem no processo e são descartadas junto com a cinza, após a queima do bagaço.

A temperatura de queima do bagaço, na caldeira da usina, varia de 850 a 1000°C. A combustão ocorre no bagaço suspenso no interior da caldeira e, para que isso seja possível sem que haja danos estruturais devido às altas temperaturas, as paredes da caldeira são arrefecidas por água de maneira contínua. O tempo médio de residência da cinza na fornalha é de 2,85 segundos. Mesmo com as altas temperaturas de queima, os resíduos saem com parte do material com combustão incompleta, sendo que essa quantidade é variável de acordo com o período da colheita e qualidade da cana.

Durante a queima do bagaço, para evitar emissão de particulados pelas chaminés, seguindo legislação ambiental pertinente para que não haja contaminação, é feita a lavagem dos gases da caldeira. Contudo, tem-se a necessidade de um tratamento de fuligem, que tem por finalidade o aproveitamento e recuperação da água, proveniente desta lavagem de gases, para reuso no processo. Além da água, a fuligem (cinzas da queima do bagaço na caldeira) é separada por processos de separação sólido / líquido através de peneiramento, sedimentação e filtração. O material sólido separado da água é a ACBC que faz parte deste estudo.

De acordo com informações de utilização do fabricante dos equipamentos instalados, constantes no manual cedido à usina, o processo de separação primária, sólido / líquido, é feito através de peneiras estáticas, classificador espiral e peneiras rotativas para separação de material grosseiro (figura 3.3).



Figura 3.3 – Peneira rotativa para retirar da água de lavagem o material grosseiro

A água, após passar pelas peneiras, passa por outra fase de separação sólido / líquido, desta vez por sedimentação. Essa separação é feita em equipamentos denominados clarificadores. A água de lavagem com particulados proveniente do lavador de gases, após passar pela separação primária, é direcionada para o clarificador. Após um determinado tempo, os sólidos são decantados para o fundo do tanque, normalmente com o auxílio de produtos químicos tais como polímeros ou floculantes, que aceleram a decantação e a limpeza da água (figura

3.4). Essa água clarificada é enviada de volta ao processo para o sistema de lavagem dos gases.



Figura 3.4 – Clarificador de água por sedimentação das partículas

A lama que sai do Clarificador é enviada por bombeamento para a etapa final do tratamento, que é a filtração. Essa separação é feita em equipamentos denominados de filtros a vácuo, do tipo desaguador horizontal. Pela ação do vácuo, enquanto o desaguador horizontal gira, os sólidos são retidos em uma manta filtrante, formando uma torta com 40 a 50% de umidade, retirando a água filtrada, que é reutilizada no processo (figura 3.5).



Figura 3.5 – Filtração a vácuo da água contida na lama em desaguador horizontal

Ao final deste processo, a torta (ACBC) cai do desaguador horizontal dentro de um silo, para o carregamento em caminhões, os

quais a transportam para as lavouras. Não há estocagem de ACBC na usina, diferente de outras empresas visitadas.

Para a coleta da ACBC na usina, após o carregamento de um caminhão, o mesmo descarregou parte do material sobre a pista de acesso ao local, facilitando a coleta de ACBC necessária aos experimentos (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Amostra de resíduo (ACBC) utilizado na coleta na usina

3.1.2. Agregados Miúdos

Os agregados miúdos, utilizados neste trabalho, foram doados por uma concreteira da cidade de Umuarama-PR. Foram utilizadas dois tipos de areias, uma quartzosa de rio e outra industrializada por britagem, ambas proveniente da região de Umuarama-PR e normalmente comercializadas na cidade.

3.1.3. Agregado Graúdo

A brita 1, de origem granítica, foi o agregado graúdo utilizado, sendo este de uso comum na região e provenientes de Umuarama-PR.

3.1.4. Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI da marca Itambé. O CPV-ARI foi escolhido para este programa experimental por não conter adições (apesar de poder conter até 5% em massa de material carbonático), para melhor explorar os efeitos da adição de ACBC em misturas cimentícias, sem a influência de adições existentes em outros tipos cimento. Sua caracterização físico-química está apresentada no Anexo 1 deste trabalho.

3.1.5. Aditivo

O aditivo utilizado foi o BASF Mastermix BF 30, de característica polifuncional de base lignosulfonato, cedido também pela concreteira. A dosagem recomendada é de até 1% da massa do cimento da mistura.

3.1.6. Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Umuarama-PR.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Tratamentos da ACBC

Altas temperaturas e tempo curto para a queima proporcionam cinzas com presença de material orgânico, que não passaram por combustão completa. Com o objetivo de melhorar a qualidade da ACBC coletada para uso neste trabalho, esta passou por diferentes tratamentos de peneiramento, moagem e requeima.

Antes de executar os tratamentos propostos, a ACBC coletada foi seca em estufa a temperatura de aproximadamente 100°C e passou por processo de peneiramento, em peneira com abertura de 2mm, para separação de restos de bagaço de cana que não sofreram combustão completa (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Restos de bagaço de cana-de-açúcar retidos na peneira de 2,0mm proveniente do peneiramento da ACBC in natura

Em seguida, utilizaram-se dois tempos de moagem diferentes em moinho de bolas: 10 minutos e 03 horas. A moagem curta, por 10 minutos, foi somente para homogeneizar a ACBC, enquanto que a moagem longa, por 03 horas, foi utilizada para cominuir o material, tornando-o mais fino. Em um terceiro tratamento, a ACBC passou por processo de requeima, baseado no estudo de Cordeiro et al. (2009), sendo queimada por 03 horas em forno mufla em temperatura de 300°C mais 03 horas em temperatura de 600°C. A tabela 3.1 apresenta a nomenclatura adotada neste trabalho para os diferentes tratamentos realizados com ACBC.

Tabela 3.1 – Nomenclatura adotada para os diferentes tratamentos da ACBC

ACBC-10m	ACBC moída em moinho de bolas por 10 minutos
ACBC-3h	ACBC moída em moinho de bolas por 3 horas
ACBC-R	ACBC requeimada por 3 horas a 300°C + 3 horas a 600°C

A moagem de 10 minutos tem finalidade de homogeneização da ACBC, sendo este um processo simples, rápido e de pouco consumo de energia. A moagem de 3 horas objetiva dar maior reatividade à ACBC através do refinamento das partículas, ou mesmo, melhorar o empacotamento dos grãos quando adicionada às misturas cimentícias. Já o tratamento por requeima tem a finalidade de diminuir a quantidade de materiais orgânicos presentes na ACBC, os quais não sofreram combustão completa na caldeira da usina, com o objetivo de proporcionar atividade pozolânica quando adicionada às misturas cimentícias.

3.2.2. Caracterização dos Materiais

Todos os materiais a serem utilizados nesta pesquisa foram caracterizados segundo suas propriedades físicas e/ou químicas, baseando-se em metodologias, sempre que possível, de ensaios normalizados.

3.2.2.1. Análise Granulométrica

Para o desenvolvimento deste trabalho, a determinação granulométrica é de grande importância, principalmente quanto ao tamanho das partículas das diferentes ACBC obtidas em processos laboratoriais. Também os agregados miúdos e graúdos foram caracterizados.

A classificação granulométrica foi executada por peneiramento de acordo com a NBR NM 248 (2003) com emprego de conjunto de peneiras (com aberturas entre 45 μm e 25 mm) acopladas a agitador mecânico. As amostras foram previamente secas em estufa à temperatura de aproximadamente 100°C. Após a classificação granulométrica, foram determinados o módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC) dos agregados.

O MF é um indicativo da finura do material e para sua obtenção, na granulometria somam-se as porcentagens retidas acumuladas de cada peneira da série normal e se divide por 100. Esta grandeza é equivalente à área da superfície entre a curva de distribuição granulométrica e a abscissa inferior (BAUER, 2000).

A DMC corresponde à abertura da malha da peneira da série normal ou intermediária, em milímetros, na qual o agregado possui porcentagem retida acumulada, em massa, igual ou imediatamente inferior a 5%. Esta grandeza é um indicativo da área superficial por unidade de volume que tem de ser recoberta pela pasta de cimento. Quanto menor a DMC, maior será a área superficial por unidade de volume (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.2.2.2. Granulometria à Laser

Após executar o peneiramento das ACBC e areias, para os materiais acumulados no fundo das peneiras (parcela fina) foi executado a granulometria à laser. As composições granulométricas foram obtidas por meio de um analisador de difração à laser Microtrac s3500 (sem meio dispersante). O intervalo de detecção foi compreendido entre 0,29 μm e 5.000 μm . A análise foi realizada pelo Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) da UFSC.

3.2.2.3. Massa Específica

Para a determinação da massa específica da ACBC foram utilizadas as especificações da NBR NM 23 (2001), com o emprego do frasco volumétrico de Le Chatelier e querosene. Para a massa específica dos agregados miúdos foi utilizado o método do picnômetro, de acordo com o descrito na NBR NM 52 (2009), enquanto que para o agregado graúdo, a massa específica foi determinada de acordo com a NBR NM 53 (2009). Em ambos os ensaios, os valores de massa específica foram obtidos a partir da média aritmética de três determinações.

3.2.2.4. Massa Unitária

Os ensaios de massa unitária para as amostras de ACBC e das areias, importantes para efeito de dosagens, foram executados segundo os procedimentos da NBR NM 45 (2006).

3.2.2.5. Superfície Específica

Para a avaliação de um processo de moagem é importante a determinação da superfície específica, pois materiais com a mesma granulometria podem apresentar superfícies específicas diferentes em decorrência de vazios interiores e da forma e rugosidade das partículas (CORDEIRO, 2006). A superfície específica é definida como a área superficial por unidade de massa, expressa em metros quadrados por quilograma. Uma das formas mais utilizadas para a obtenção da superfície específica é a técnica desenvolvida por Blaine, normalizada pela NBR NM 76 (2015). Neste método, a superfície específica do material granular é proporcional ao tempo no qual certa quantidade de ar atravessa a camada de material compactado com porosidade padrão.

As ACBC, utilizadas nesta pesquisa em substituição de parte dos agregados miúdos nas misturas de concretos e argamassas, tiveram as superfícies específicas caracterizadas pelo Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento da Votorantim, localizado no Município de Abranches – PR. Apesar do método de Blaine ser mais indicado para materiais em pó, esta foi a opção adotada pelo laboratório em questão, pois trata-se do método empregado pela indústria cimenteira e por usinas de concreto para o controle de qualidade das adições no processo de produção.

3.2.2.6. Composição Química

A composição química da ACBC foi determinada em análise semi-quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento da Votorantim, localizado no Município de Abranches – PR, onde também realizaram o ensaio de perda ao fogo (PF), de acordo com procedimentos prescritos na NBR NM 18 (2012).

3.2.2.7. Resistência à Compressão de Pastas com Hidróxido de Cálcio

Para avaliar o potencial efeito pozolânico da ACBC, foram realizados estudos sobre o consumo de CaOH baseado nos trabalhos de Cheriaf et al (1999). A mistura de referência possui quartzo moído, como material inerte e aditivo. Já nas pastas com ACBC, o quartzo

moído foi substituído em 100%, 75%, 50% e 25% para cada tipo de ACBC tratada, adicionando-se aditivo superplastificante para manter-se o índice de consistência das misturas em ± 10 mm do obtido para a pasta de referência.

As pastas foram misturadas mecanicamente com uso de argamassadeira. Primeiro misturou-se o cimento, água e aditivo por 30 segundos na velocidade lenta. Posteriormente foram adicionados o restante dos materiais e misturados por mais 30 segundos na velocidade lenta. Desligando o equipamento, raspou-se a cuba e deixou-se o material repousar por 30 segundos. O processo foi finalizado com misturando-se a pasta por mais 60 segundos na velocidade rápida.

Para cada mistura foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 2x4 cm, para serem ensaiados à compressão nas idades de 3, 7, 14, 28 e 60 dias. Estes corpos-de-prova permaneceram em seus moldes, até o momento do ensaio à compressão, guardados em caixa de isopor em ambiente climatizado para 23°C. As superfícies que entrariam em contato com a máquina de ensaios foram lixadas para regularização.

Nas pastas foram avaliados o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pela análise térmica diferencial e, a identificação dos produtos formados, pela técnica de análise por microscopia eletrônica e difração de raios X.

3.2.2.8. Difração de Raios X

Ensaio de difração de Raios X baseiam-se na identificação das fases cristalinas presentes no material analisado. Os picos presentes na difração são comparados com banco de dados específicos, permitindo avaliar o quanto uma amostra é amorfa ou cristalina. Os dados gerados pelo ensaio são compilados em difratograma, onde a intensidade dos picos de difração está relacionada com os respectivos ângulos de difração, que variam no decorrer da análise.

A base teórica da análise por difração está associada ao fato de que, na grande parte dos sólidos (cristalinos), os átomos ordenam-se 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, outro feixe de raios difratados é produzido (CORDEIRO, 2006).

Nesta pesquisa foi utilizada a metodologia da intensidade integrada para estimar a quantidade das fases mineralógicas da ACBC e de pastas de hidróxido de cálcio com ACBC. Os picos foram analisados por meio do software *Origin Scientific Graphing*.

3.2.2.9. Atividade Pozolânica

Os diversos métodos empregados na avaliação da atividade pozolânica estão baseados na determinação da resistência à compressão de argamassas ou na evolução do consumo de Ca(OH)_2 no tempo. Os métodos normalizados pela ABNT estão descritos a seguir.

3.2.3. Determinação do Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland é um importante parâmetro para a avaliação da reatividade de um material a ser empregado como aditivo mineral por simular uma situação real de aplicação (CORDEIRO, 2006). A NBR 5752 (2014) estabelece o índice de atividade pozolânica com cimento Portland através da relação entre as resistências à compressão de argamassa com pozolana e argamassa composta apenas por cimento, areia e água.

3.2.3.1. Índice de Atividade Pozolânica com Cal aos 7 dias

O índice de atividade pozolânica, de acordo com a NBR 5751 (2012), é obtido a partir do valor médio de resistência à compressão aos 7 dias de uma argamassa composta de uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio, nove partes de areia normalizada e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponde ao dobro do volume de hidróxido de cálcio. A quantidade de água da mistura é a suficiente para obtenção de índice de consistência de 225 ± 5 mm, medido pelo ensaio de espalhamento em mesa. A cura durante as primeiras 24 horas é realizada a temperatura de 23 ± 2 °C. Durante os 6 dias posteriores os corpos-de-prova são mantidos à temperatura de $55^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ dentro dos próprios moldes protegidos da perda de umidade.

3.2.3.2. Análise Térmica Diferencial

As análises térmicas diferenciais e termogravimetria foram realizadas em pastas de hidróxido de cálcio com ACBC in natura aos 28 dias. Procurou-se identificar a participação da ACBC in natura como material cimentício suplementar (MCS). As pastas formuladas com Ca(OH)_2 foram avaliadas quanto ao consumo do CH e evolução da resistência à compressão aos 3, 7, 14, 28 e 60 dias.

Após parar a hidratação das amostras, por meio da secagem à 50°C , as amostras foram reduzidas para dimensões inferiores a 50 μm . O pó resultante foi usado para as análises térmicas, efetuadas por meio de um analisador térmico simultâneo TGA/DSC (SDT Q600 - TA Instruments) pelo Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em

Construção Civil (NANOTEC) da UFSC, usando uma taxa de aquecimento de 10°C/min até a temperatura de 600°C.

3.2.3.3. Consistência

Para as misturas de concreto desta pesquisa, foram realizados ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, que é regularmente empregado na avaliação da trabalhabilidade do concreto em virtude de sua fácil execução. O abatimento foi determinado 2 minutos após o término do processo de mistura dos concretos, de acordo com os procedimentos descritos na NBR NM 67 (1998). Para as medições de consistência das argamassas foram realizadas pelo ensaio da mesa de espalhamento (*flow table*) de acordo com a norma NBR 13276 (2005).

3.2.3.4. Monitoramento da Pega

A ASTM C403 (2008) prescreve o método de determinação dos tempos de pega de concretos e argamassas de cimento Portland por meio da medida da resistência à penetração. Em seu trabalho, Irrigaray (2012) utiliza o método de ultrassom para estabelecer os tempos de pega, correlacionando com o penetrômetro de Proctor.

Neste trabalho, foram realizados, paralelamente, ensaios com o Penetrômetro de Proctor, Método de Ultrassom e monitoramento de Temperatura, para os concretos e argamassas no estado fresco, durante as primeiras 24 horas após o contato do cimento com a água das misturas. As leituras de VPU e temperatura foram automatizadas a cada 5 minutos, enquanto que as leituras com o penetrômetro seguiu-se as recomendações da norma.

a) Penetrômetro de Proctor

De acordo com a ASTM C403 (2008), início e fim de pega são:

- Tempo de início de pega - tempo decorrido após o contato inicial do cimento com a água de amassamento, necessário para uma argamassa atingir a resistência à penetração igual a 3,4 MPa;
- Tempo de fim de pega - Tempo decorrido após o contato inicial do cimento com a água de amassamento, necessário para uma argamassa atingir a resistência à penetração igual a 27,6 MPa.

b) Método de Ultrassom

Em seus experimentos, Irrigaray (2012) alcançou resultados bastante satisfatórios com a utilização do ultrassom em argamassas e pastas de cimento utilizando cimentos CP V ARI e CP IV 32, afirmando que o procedimento de empregar a velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos para a detecção de início e fim de pega é mais rápido e mais prático do que o ensaio em que se emprega o penetrômetro de Proctor.

Este método pode ser utilizado correlacionando com os valores obtidos no penetrômetro de Proctor com os valores da velocidade de pulsos ultrassônicos através da argamassa peneirada. Após o lançamento e adensamento inicia-se o monitoramento da velocidade de pulsos ultrassônicos na argamassa peneirada, empregando-se dispositivo apropriado. Os dois dispositivos utilizados para medir a velocidade das pastas, argamassas e concretos possuíam dimensões de 10 cm x 20 cm x 20 cm e de 20 cm x 20 cm x 20 cm. Ambos possuíam estrutura externa em madeira compensada de 20 mm, revestidas internamente por vidro de espessura igual a 6,0 mm em duas faces para garantir uma perfeita planicidade da superfície. As outras faces foram revestidas com borracha de 20 mm. Nas faces revestidas com vidro foram feitos dois furos circulares de 50 mm de diâmetro na madeira compensada, a uma distância de 10 cm da base. Sobre esses dois furos, foram acoplados flanges de 60 mm, colados e aparafusados, servindo de guia para os transdutores do ultrassom. Para obter perfeita aderência entre o vidro e o transdutor, foi necessário colocar o transdutor dentro de um niple duplo previamente retificado de PVC de 60 mm. Para que ficasse mais fácil de rosquear o niple ao flange, cortou-se a outra rosca do niple, tornando-o um niple simples. O dispositivo possuiu um sistema de parafusos que permitiu moldar e desenformar facilmente os concretos (IRRIGARAY, 2012).

Este tipo de dispositivo também foi utilizado neste programa experimental para monitorar o processo de hidratação em concretos e argamassas confeccionados com ACBC, conforme especificações de Irrigaray (2012). A figura 3.8 apresenta o dispositivo empregado, o qual é apresentado com detalhes no Anexo 2 deste trabalho.



Figura 3.8 – Dispositivo para monitoramento de velocidades de pulsos ultrassônicos baseado no dispositivo de Irrigaray (2012)

Transdutores circulares de diâmetro 50 mm e frequência de 54 kHz foram utilizados. Tão logo a argamassa era confeccionada, preenchia-se o dispositivo, acoplava-se os transdutores e iniciava-se a medição contínua de velocidade dos pulsos ultrassônicos. Com intervalos regulares de 5 minutos, e os tempos de propagação foram armazenados de forma contínua até a idade aproximada de 24 horas após a confecção de cada mistura de concreto e argamassa.

c) Monitoramento da Temperatura

As temperaturas foram obtidas através da instalação de dois termopares tipo T, um para monitoramento da temperatura interna das misturas frescas, outro externamente às misturas para monitoramento da temperatura ambiente.

Durante o período de execução experimental, as misturas foram expostas à diferentes regimes de temperaturas, pois no laboratório não havia ambiente climatizado para mantimento de uma temperatura padrão. Sabe-se que o endurecimento de misturas cimentícias ocorre em função do tempo e do histórico de temperaturas no qual forem submetidas. Em idades precoces, a temperatura tem grande influência no desenvolvimento da resistência (MALHOTRA; CARINO, 2004). Sendo assim, de forma a compensar o efeito de temperatura para uma análise mais precisa do efeito das cinzas, funções de maturidade foram utilizadas para transformar idade real em idades equivalentes (te). Para tanto, utilizou-se a função de maturidade proposta por Freisleben-Hansen e Pedersen, como preconizado pela ASTM C1074 (2011) e reproduzida na Equação 3.1. No uso desta função, há necessidade de se conhecer a dependência da mistura à temperatura dado pela energia de

ativação (E_a). Neste trabalho optou-se pelo valor de 30 kJ/mol, valor intermediário aos apresentados em um estudo amplo com diversas misturas (PINTO; SCHINDLER, 2010). Neste estudo, para o cimento americano tipo I sem adições, os valores relatados se situam entre 22 kJ/mol a 37,9 kJ/mol.

$$t_e = \sum e^{-\frac{E_a}{R} \left(\left(\frac{1}{t} \right) - \left(\frac{1}{t_r} \right) \right)} \Delta t \quad \text{Equação 3.1}$$

onde:

t_e - idade equivalente à da temperatura de referência;

E_a - energia de ativação (J/mol);

R - constante universal dos gases = 8,314 J/mol-K

t - temperatura média da mistura no intervalo Δt ;

t_r - temperatura de referência (20°C);

Δt - intervalo de tempo.

3.2.3.5. Resistência à Compressão

A resistência à compressão das misturas foram obtidas de acordo com as prescrições da NBR 5739 (2007). Para os concretos foi avaliada através da ruptura de corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20 cm, enquanto que para as argamassas utilizou-se corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm, rompidos nas idades de 3, 7, 14, 28 e 60 dias. Os corpos-de-prova cilíndricos foram curados submersos em água saturada com cal e, antes da ruptura, foram capeados com enxofre fundido de forma a garantir planicidade e paralelismo entre o topo e a base.

3.2.3.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na microscopia eletrônica de varredura, quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, são originados diferentes sinais, como elétrons secundários e 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 (SARKAR; AIMIN; JANA, 2001).

No trabalho desenvolvido por Cordeiro (2006), foi possível investigar mudanças significativas no tamanho e na morfologia das partículas das cinzas residuais, provocadas pelos diferentes tipos de moagem por meio dos recursos da microscopia eletrônica de varredura.

Além disso, este método foi utilizado para a investigação da evolução das reações de hidratação e do desenvolvimento da microtextura de pastas de cimento em diferentes idades.

Neste trabalho foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura modelo JEOL JSM-6390LV, equipado com espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS), do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica de Varredura (LCME) da UFSC. As amostras foram aderidas por adesivo condutor de carbono em recipientes de latão e, em seguida, recobertas com fina camada de ouro para também torná-las condutoras.

Foram analisadas as amostras de ACBC nos seus três tratamentos, assim como, nos fragmentos de argamassas resultantes das amostras rompidas ao esforço de compressão. As amostras de argamassas com adição de ACBC foram preparadas seguindo os procedimentos abaixo:

- Fragmentos de argamassa foram coletados do miolo dos corpos-de-prova após ruptura à compressão;
- Para parar a hidratação, os fragmentos foram deixados mergulhados em acetona P.A. durante 48 horas, em temperatura ambiente;
- Após 48 horas, os fragmentos foram filtrados e colocados para secar em estufa ventilada durante 72 horas, com temperatura constante de 50°C;
- Para finalizar, as amostras foram embaladas em filme impermeável e armazenadas em frascos hermeticamente vedados, até o momento da análise.

3.2.3.7. Módulo de Elasticidade Dinâmico

Os módulos de elasticidade foram obtidos por meio dos valores de VPU dos corpos-de-prova cúbicos de arestas de 20 cm, nas idades de 3, 7, 14, 28 e 60 dias. Este módulo é conhecido como módulo de elasticidade dinâmico. Para o cálculo dos módulos foram usadas as relações das Equação 2.1 e 2.2 apresentadas no item 2.3 deste trabalho. Conforme a Equação 2.1, a velocidade do pulso ultrassônico é diretamente proporcional à raiz quadrada do módulo de elasticidade dinâmico.

3.2.3.8. Caracterização Física das Argamassas

O estudo da interação entre a camada superficial do concreto com o ambiente externo é determinante para o entendimento dos processos de degradação (ingresso de cloretos e sulfatos, carbonatação,

ciclos de molhagem-secagem). Estes processos, em geral, estão associados a fenômenos físico-químicos entre constituintes do concreto e agente agressivo, em presença de água. Desta forma, a avaliação do índice de vazios do concreto torna-se relevante na estimativa da durabilidade de uma estrutura construída com esse material (CORDEIRO, 2006).

Para absorção de água por imersão total, índice de vazios (I_v) e massa específica (δ), a norma utilizada foi a NBR 9778 (2011). O índice de vazios está associado ao volume total de poros com acesso à água, o que não condiz com a facilidade da água poder penetrar no concreto. As Equações 3.2 e 3.3 são utilizadas para o cálculo do I_v e δ , respectivamente.

$$I_v = \frac{m_t - m_s}{m_t - m_i} \times 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

$$\delta = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

m_t = massa saturada em água;

m_s = massa seca;

m_i = massa saturada e imerso em água.

Para a determinação da absorção de água por capilaridade (A_c) nas misturas de argamassa foram seguidos os procedimentos estabelecidos pela NBR 9779 (2012). Os corpos-de-prova foram colocados em suportes dentro da água, de modo que o nível da água fosse mantido constante em 5 ± 1 mm acima da face inferior dos mesmos. Foram medidos o ganho de massa com o tempo de 3, 6, 24, 48 e 72 horas em contato com a água. Utiliza-se a Equação 3.4 para os cálculos.

$$A_c = \frac{m_c - m_s}{A_e} \quad \text{Equação 3.4}$$

onde:

m_c = massa do corpo-de-prova em contato com a água para cada período;

A_e = área da seção transversal do corpo-de-prova.

3.3. DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E ARGAMASSAS

Para o estudo experimental, fez-se a adição de ACBC em misturas de concretos e argamassas. Todos os materiais para a produção das misturas (agregados, cimento e aditivo) foram cedidos por uma concreteira da cidade de Umuarama-PR. A seguir estão descritas as etapas para definição dos traços para a produção de concretos e argamassas de referência e com adição de ACBC.

3.3.1. Granulometria dos Agregados e ACBC

Para a definição dos traços e produção dos concretos e argamassas fez-se necessário o conhecimento prévio das características granulométricas dos materiais utilizados.

Os agregados finos utilizados, areia natural de rio e areia de britagem, foram quantificados de forma que o módulo de finura (MF) fosse classificado na zona ótima de utilização, com MF igual a 2,65, apresentando configuração final de 58% de areia natural de rio e 42% de areia de britagem, do total de agregados miúdos. A dimensão máxima característica (DMC) ficou em 4,75mm. A Figura 3.9 apresenta as curvas granulométricas da areia natural de rio, areia de britagem e a composição final utilizada (58% natural e 42% britagem).

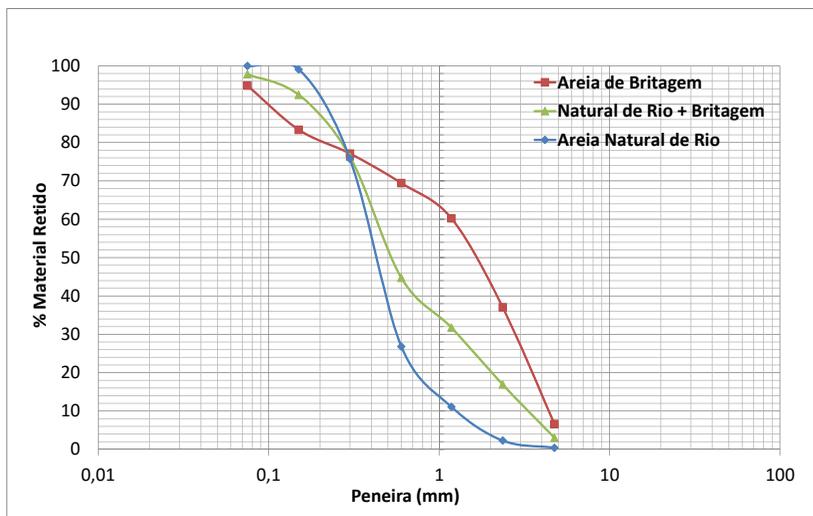


Figura 3.9 – Granulometria da areia natural de rio, areia de britagem e composição da areia natural de rio (58%) mais areia de britagem (42%)

A massa específica da areia natural de rio é de 2.246 kg/m^3 e sua massa unitária de 1.615 kg/m^3 , enquanto que a massa específica da areia de britagem é de 2.949 kg/m^3 e massa unitária de 1.952 kg/m^3 . As massas específicas foram obtidas pela NBR NM 52 (2009), enquanto que as massas unitárias foram obtidas de acordo com a NBR NM 45 (2006).

A composição granulométrica do agregado graúdo utilizado nas misturas de concreto está apresentado na curva granulométrica da figura 3.10. São grãos bastante homogêneos, sendo que aproximadamente 97,5% ficaram retidos na peneira de 12,5mm. Seu MF apresentou um valor de 6,99 e seu DMC foi de 19,0mm.

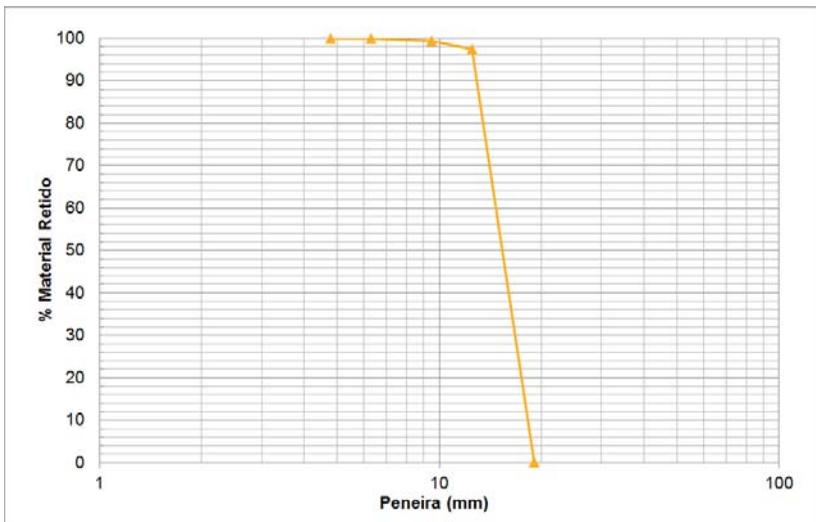


Figura 3.10 – Granulometria do agregado graúdo

A massa específica do agregado graúdo é de 2.949 kg/m^3 , obtida de acordo com a NBR NM 53 (2009). Já sua massa unitária de 1.610 kg/m^3 , obtida tomando como base a NBR NM 45 (2006).

A Figura 3.11 apresenta a curva granulométrica da ACBC *in natura* após o processo de peneiramento, em peneira com abertura de 2mm, para separação de restos de bagaço de cana que não sofreram combustão completa.

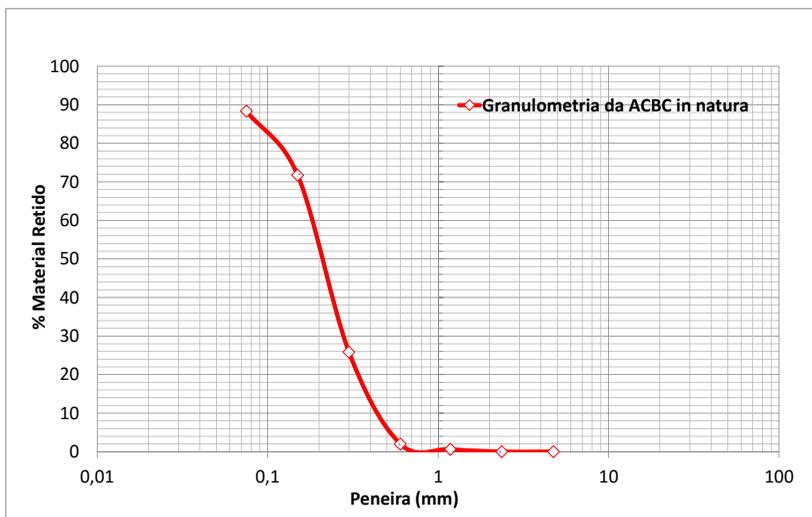


Figura 3.11 – Granulometria da ACBC in natura após peneiramento em peneira de abertura de 2 mm para separação de material que não sofreu combustão completa na usina

Para a ACBC *in natura*, ACBC-10m, ACBC-3h e agregados miúdos, foram feitos ensaios de granulometria à laser para os materiais acumulados no fundo das peneiras (parcela fina), passantes pela peneira de abertura de 150 μm e os resultados estão apresentados na Figura 3.12. A parcela fina dos agregados miúdos, acumulada no fundo das peneiras, é de aproximadamente 7,5% do total (em massa) dos agregados miúdos.

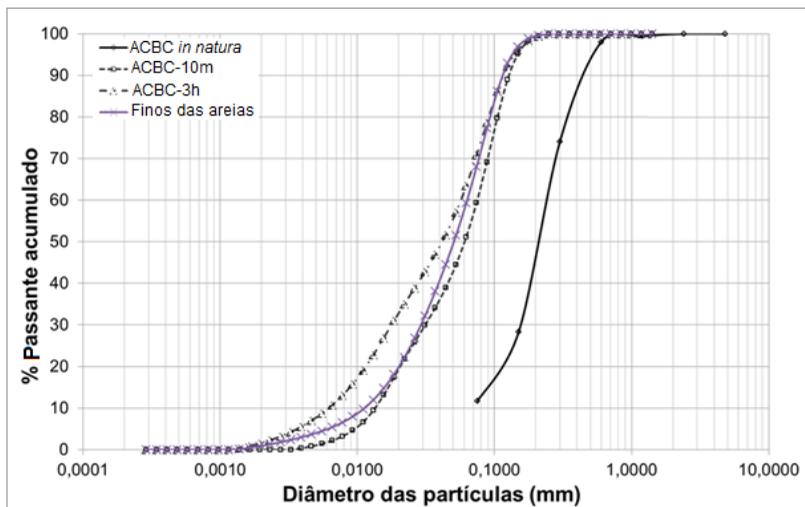


Figura 3.12 – Granulometria à laser das partículas passantes pela peneira com abertura de 2 μm da ACBC in natura, ACBC-10m, ACBC-3h e finos dos agregados miúdos

Conforme a análise granulométrica, os processos de moagem (10 minutos e 3 horas) tornaram as cinzas com dimensões de partículas próximas à parcela de finos dos agregados miúdos. A ACBC in natura possui as maiores dimensões de partículas. A tabela 3.2 apresenta as dimensões dos grãos obtidos com a granulometria à laser.

Tabela 3.2 – Dimensão dos grãos da ACBC in natura, ACBC-10m, ACBC-3h e finos das areias

Tamanho	CBC in natura	CBC-10m	CBC-3h	Finos das areias
D90 (mm)	0,4	0,15	0,15	0,15
D50 (mm)	0,2	0,06	0,04	0,05
D10 (mm)	-	0,015	0,006	0,01

Com o beneficiamento da ACBC in natura, a moagem pode reduzir as partículas majoritariamente para dimensões inferiores à 105 μm . As dimensões médias, que a princípio para a ACBC in natura eram mais grossas em relação aos finos das areias, foram de 40 μm para a ACBC beneficiada com moagem durante 3 horas e 60 μm para moagem

durante 10 minutos. Proporcionou 10% de partículas com 6 μm para a ACBC-3h e 15 μm para a ACBC-10 min.

3.3.2. Definição do Traço e Produção das Misturas de Concreto

Nesta etapa do estudo experimental, a ACBC foi testada em misturas de concreto. Uma mistura de referência foi produzida sem areia de cinza e, a partir do traço desta mistura, foram produzidos concretos com 5, 10 e 20% de adição de ACBC em substituição dos agregados miúdos do concreto. As areias de cinzas adicionadas foram provenientes dos três diferentes tratamentos, sendo eles a moagem curta (ACBC-10m), a moagem longa (ACBC-3h) e a requeima (ACBC-R), como descrito item 3.2.1 deste trabalho. A fim de verificar o consumo de água das misturas com ACBC, manteve-se a trabalhabilidade dos concretos, conforme a mistura de referência.

A escolha das porcentagens de substituição dos agregados miúdos por ACBC, de 5, 10 e 20%, foi baseada em estudos de outros autores que, ao testarem diversas porcentagens de substituição, alcançaram bons resultados para substituição de até 30% (Sales e Lima, 2010; Souto, 2010; Agassi et al., 2012; Sampaio 2013). A substituição de 20% de ACBC-R não foi testada neste trabalho por demandar grande quantidade de areia de cinza requeimada para a produção de concreto, visto que o processo de requeima é bastante demorado e o equipamento disponível para a queima do material para este trabalho era limitado à pequenos volumes.

O traço utilizado para a produção dos concretos foi baseado em um traço de concreto convencional, cedido pela mesma concreteira da cidade de Umuarama-PR que doou os materiais para este programa experimental. Este traço é para a produção de um concreto de fck 25 MPa, *slump* de 8 ± 2 cm e fator água/cimento (a/c) de 0,675. A tabela 3.3 apresenta os quantitativos, em massa, para a produção de 1m^3 de concreto.

Tabela 3.3 – Materiais necessários para a produção de 1 m³ de concreto (em massa)

Materiais (kg)	Referência	5% de ACBC	10% de ACBC	20% de ACBC
Areia natural de rio	676,0	642,2	608,4	540,8
Areia de britagem	490,0	465,5	441,0	392,0
ACBC	-	58,3	116,6	233,2
Brita 1	1056,6	1056,6	1056,6	1056,6
Cimento CP V ARI	252,2	252,2	252,2	252,2
Aditivo	2,0	2,0	2,0	2,0
Água	170,2	170,2*	170,2*	170,2*

* Variável para manter a trabalhabilidade em 8 ± 2 cm

Para cada tipo de concreto foram moldados 4 corpos-de-prova cilíndricos de com dimensões de 10x20 cm (diâmetro e altura) para ensaio de resistência à compressão para rompimento aos 28 dias. Para monitoramento da velocidade dos pulsos ultrassônicos e temperaturas, nos concretos frescos, foram moldados cubos com 20 cm de arestas, um para cada mistura.

No total foram confeccionadas 10 diferentes misturas, sendo uma de referência e as 9 restantes devido à combinação dos três diferentes tratamentos de ACBC e três diferentes porcentagens de substituição dos agregados miúdos por ACBC.

Para leituras de velocidade das ondas ultrassônicas em idades iniciais para o concreto no estado fresco, foram adotados os procedimentos empregados por Irrigaray (2012), de acordo com o procedimento já descrito no item 3.2.2.13 deste trabalho. Após o lançamento do concreto fresco no cubo, este foi coberto com um filme plástico para evitar a evaporação precoce da água e inseridos termopares para o monitoramento das temperaturas.

3.3.3. Definição do Traço e Produção das Misturas de Argamassa

Inicialmente, três misturas de argamassa de referência (sem adição de CBC) foram produzidas na proporção de 1:3 (1 parte de cimento para 3 partes de agregados miúdos), com relação água/cimento (a/c) de 0,44, 0,48 e 0,52. A porção de agregados miúdos é composta

por 58% de areia natural de rio e 42% de areia de britagem, conforme apresentado no item 3.3.1 deste trabalho.

A escolha das relações a/c baseou-se na consistência apresentada pelas misturas. Argamassas com adição de ACBC possuem menor consistência, enquanto que as argamassas de referência (sem ACBC), os valores obtidos de consistência foram maiores. A relação a/c de 0,44 foi a menor relação possível capaz de conferir às misturas com ACBC o mínimo de trabalhabilidade. Relações a/c maiores que 0,52 causaram grande fluidez às misturas sem ACBC.

Na Tabela 3.4 são apresentados os traços para a produção das diferentes misturas das argamassas de referência. Utilizou-se o CP V ARI e aditivo polifuncional.

Tabela 3.4 – Traços para produção das argamassas de referência (em massa)

Materiais (kg)	Ref (0,44)	Ref (0,48)	Ref (0,52)
Areia natural de rio	1,74	1,74	1,74
Areia de britagem	1,26	1,26	1,26
Cimento CP V ARI	1	1	1
Aditivo	0,01	0,01	0,01
Água	0,44	0,48	0,52

Para as argamassas com ACBC, de forma a manter as características granulométricas das misturas, somente a proporção fina dos agregados miúdos foi substituída por ACBC, já que a ACBC possui uma grande quantidade de finos em sua composição. Assim, as areias natural e de britagem foram peneiradas com peneira de abertura de 150 µm, sendo utilizado o material retido e descartado o material passante. Como já apresentado, os finos das areias passantes pela abertura de 150µm, totalizou aproximadamente 7,5% da massa, sendo este valor adotado como padrão para a adição das areias de cinzas.

As areias de cinzas também foram peneiradas da mesma forma, sendo o material retido descartado e o material passante utilizado para a substituição dos 7,5% dos agregados miúdos, mantendo a proporção de 1:3 das misturas de argamassa. A Tabela 3.5 apresenta os traços das misturas de argamassas com ACBC.

Tabela 3.5 – Traços para produção das argamassas com ACBC (em massa)

Materiais (kg)	ACBC (0,44)	ACBC (0,48)	ACBC (0,52)
Areia natural de rio	1,610	1,610	1,610
Areia de britagem	1,166	1,166	1,166
ACBC	0,225	0,225	0,225
Cimento CP V ARI	1	1	1
Aditivo	0,01	0,01	0,01
Água	0,44	0,48	0,52

No total foram confeccionadas 12 diferentes misturas de argamassa, sendo três de referência, e as nove restantes devido à combinação de três relações água/cimento e três diferentes tipos de tratamento da ACBC. Cada mistura foi repetida para a execução dos ensaios de tempo de pega e de velocidade de pulso ultrassônico, totalizando vinte e quatro misturas de argamassa.

As misturas foram feitas em misturador mecânico. Primeiramente colocava-se todo o cimento, todo o aditivo e parte da água na cuba e misturava-se por aproximadamente 1 minuto. Raspava-se a cuba e deixa-se em repouso por mais 1 minuto. Posteriormente colocava-se toda a ACBC e misturava-se por 2 minutos. Mais um minuto para raspagem e repouso. Para finalizar, adicionavam-se toda a areia e o restante da água, misturando por aproximadamente 5 minutos.

Foram confeccionados diversos corpos-de-prova para diferentes finalidades: corpos-de-prova cilíndricos de 15x30 cm para ensaios de pega com penetrômetro; corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm para ensaios à compressão, absorção de água por capilaridade, absorção por imersão total em água, massa específica e índice de vazios; corpos-de-prova cúbicos de 20 cm de arestas para ensaios de velocidade de pulsos ultrassônicos (VPU). Nos corpos-de-prova para ensaio de pega e de VPU, termopares foram inseridos para o monitoramento das temperaturas iniciais.

Após moldagem, os corpos-de-prova confeccionados foram desmoldados depois de aproximadamente 24 horas e colocados para cura submersos em água, saturada com cal, até o momento de serem ensaiados. Os ensaios de resistência à compressão das argamassas foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm, nas idades de 3, 7, 14, 28 e 60 dias, sendo ensaiados 6 CP por idade para cada tipo de mistura de argamassa. Para os ensaios de absorção por capilaridade, absorção por imersão total em água e índice de vazios, também foram

utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm, nas mesmas idades, sendo ensaiados 2 CP por idade para cada tipo de mistura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ACBC

De acordo com Cordeiro (2006), o bagaço da cana-de açúcar possui estrutura fibrosa e a alta concentração de sílica na composição da ACBC justifica-se pelo fato que, nas paredes externas das células da epiderme das folhas da cana são depositadas sílica gel, proveniente da absorção do silício do solo pelas raízes da planta. Outra possível fonte de sílica da ACBC é a areia (quartzo) proveniente das lavouras que, no processo de lavagem da cana, antes da moagem na usina, permanece misturada ao bagaço.

As Figuras 4.1 a 4.3 apresentam a morfologia das partículas da ACBC, por meio de microscopia de varredura eletrônica (MEV), após os tratamentos realizados. Verifica-se que a estrutura celular é caracterizada por elementos fibrilares e altamente porosos. Ao comparar a aparência da ACBC-10m com a ACBC-3h, percebe-se que na moagem longa os elementos fibrilares foram rompidos apresentando partículas menores. Em relação à ACBC-R, verifica-se maior porosidade nos elementos fibrilares em relação às outras duas cinzas. Em todas elas há contaminação por partículas de quartzo (grãos sólidos mais claros).

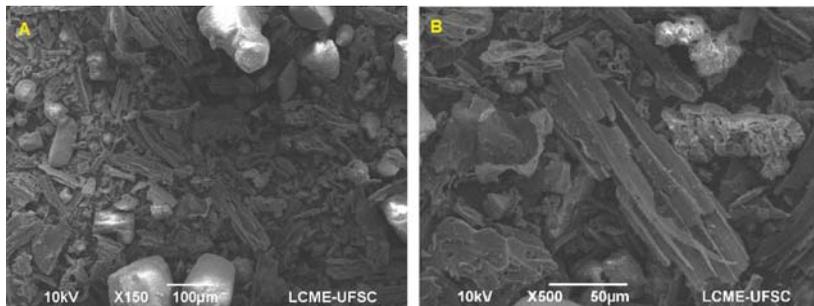


Figura 4.1 – Morfologia de partículas da ACBC-10m por MEV (A -aumento de 150x; B -aumento de 500x)

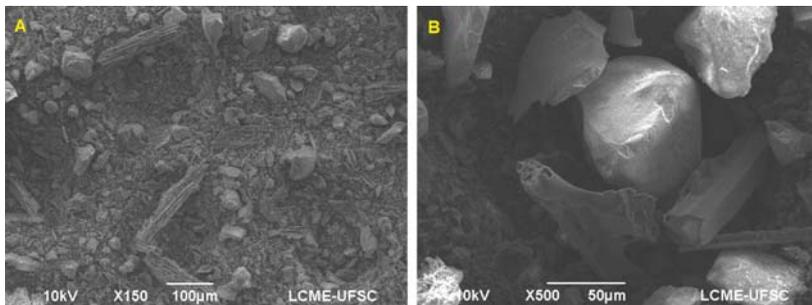


Figura 4.2 – Morfologia de partículas da ACBC-3h por MEV (A - aumento de 150x; B - aumento de 500x)

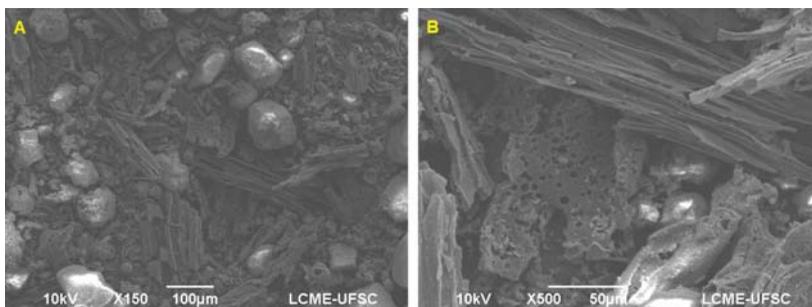


Figura 4.3 – Morfologia das partículas da ACBC-R por MEV (A - aumento de 150x; B - aumento de 500x)

A composição química da ACBC *in natura* (conforme coletada na usina), da ACBC-10m, da ACBC-3h e da ACBC-R, estão apresentadas na Tabela 4.1, sendo determinadas em análise semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). Paralelamente foi realizado o ensaio de perda ao fogo (PF) para determinação da porcentagem de substâncias não minerais.

Tabela 4.1 – Composição química das areias de cinzas por FRX e PF

Concentração (%)	CBC in natura	CBC-10m	CBC-3h	CBC-R
SiO₂	76,55	71,41	70,32	83,11
Al ₂ O ₃	2,53	4,64	3,27	3,47
Fe ₂ O ₃	2,59	4,41	2,84	2,78
CaO	1,20	1,60	1,19	1,35
MgO	1,63	1,24	0,89	1,08
Na ₂ O	0,09	0,00	0,00	0,01
K ₂ O	1,32	2,12	2,04	2,89
TiO ₂	0,53	1,13	0,73	0,90
P ₂ O ₅	0,69	0,88	0,69	0,86
MnO ₃	0,008	0,174	0,113	0,131
SO ₃	0,40	0,02	0,05	0,06
Cl	0,027	0,028	0,072	0,105
Cr ₂ O ₃	-	0,043	0,045	0,032
Co ₃ O ₄	0,115	0,022	0,021	0,023
NiO	-	-	-	-
CuO	-	0,014	0,009	0,012
SeO ₂	-	0,005	-	-
ZnO	-	-	0,017	0,018
Rb ₂ O	-	0,004	0,005	0,007
SrO	0,005	0,014	0,012	0,014
Y ₂ O ₃	-	0,037	0,036	0,002
ZrO ₂	0,015	0,053		0,053
Nb ₂ O ₅	-	0,002	0,002	0,002
BaO	-	0,018	0,018	0,036
CeO ₂	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-
PF	12,31	11,89	17,08	2,57

Os resultados mostram que, aproximadamente 77% da ACBC *in natura* é composta por sílica (SiO₂), enquanto que para a ACBC-10m e a ACBC-3h é de aproximadamente 71% e 83% para a ACBC-R. Durante o processo de requeima da ACBC, eliminou-se boa parte das fibras do bagaço da cana que não sofreram combustão completa durante a queima na usina, o que explica a maior quantidade de sílica para a

ACBC-R em relação as outras ACBC. A princípio, não deveria ter diferença na quantidade de sílica entre a ACBC *in natura* com a ACBC-10m e ACBC-3h. Provavelmente a amostra de ACBC *in natura* não tenha sido representativa do todo, pois esta foi a primeira a ser enviada para a análise laboratorial, enquanto que as outras três cinzas foram separadas e enviadas posteriormente.

De acordo com Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), a areia de cinza proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar apresenta como principal composto químico a sílica, o que normalmente é encontrada em quantidade acima de 60% em massa, mostrando que a cinza utilizada neste estudo possui quantidade de sílica característica de acordo com outras cinzas já estudadas. Ainda, de acordo com os autores, conforme as condições de queima, pode-se manter a sílica do bagaço em estado amorfo, o que possibilitaria o emprego desse resíduo como pozolana.

Quanto à perda ao fogo (PF), os valores encontrados para a ACBC *in natura*, ACBC-10m e ACBC-3h situaram-se acima do limite de 6% descrito pela ASTM C 618 (2012), para que o material seja classificado como pozolânico. A ACBC-R apresentou 2,57% de PF e, ao contrário das cinzas moídas, a cinza requeimada pode ser considerada como material com potencial pozolânico e seu aspecto mais claro já indica baixa composição de materiais carbonosos. A maior quantidade de K_2O encontrada na ACBC-R deve-se ao tempo superior de queima pelo qual o resíduo foi submetido. Valores elevados de PF geralmente resultam em descoloração, segregação e baixa resistência à compressão do material quando adicionado em misturas de concreto (MALHOTRA; MEHTA, 1996).

Para a ACBC *in natura* foi determinado o índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal de acordo com a NBR 5751 (2012). Os resultados apresentados na Tabela 4.2 indicam que a amostra de areia de cinza ensaiada atingiu um valor de IAP de 4,3 MPa, inferior ao valor de 6,0 MPa indicado pela NBR 12653 (2012) para ser considerada como material pozolânico.

Tabela 4.2 – Índice de atividade pozolânica para a ACBC in natura de acordo com a NBR 5751 (2012)

Resultados	ACBC in natura
IAP (MPa)	4,3
#325 (%)	1,4
Massa específica (g/cm³)	2,45
Água de amassamento (g)	215

Os resultados da verificação de pozolanicidade através do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, conforme descrito na NBR 5752 (2014) e resultados de superfície específica, de acordo com a NBR 16372 (2015) para as diferentes cinzas residuais tratadas, estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Índice de desempenho pozolânico com cimento Portland de acordo com NBR 5752 (2014) e área de superfície específica de acordo com NBR 16372 (2015)

Tratamentos	Índice de Desempenho com Cimento (%)	Superfície Específica (m²/kg)
ACBC-10m	89,4	308
ACBC-3h	87,5	452
ACBC-R	102,3	178

De acordo com a NBR 12653 (2012), para ser considerado um material pozolânico o índice de desempenho deve ser de no mínimo 90%. Sendo assim, as areias de cinzas tratadas com moagem apresentam potencial para o desenvolvimento de pozolanicidade, enquanto que a areia de cinza requeimada, pelo índice apresentado, caracteriza-se como material pozolânico.

Quanto a área de superfície específica, esta é um indicativo da reatividade do material. Quanto maior o valor, maior a reatividade e maior a quantidade de água necessária na mistura. Em estudo realizado por Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), foi afirmado que moagem até 80% do total da cinza do bagaço da cana para tamanho máximo de aproximadamente até 60 μm e área de superfície específica acima de 300 m²/kg, resulta em CBC com propriedades pozolânicas. Ao comparar os resultados obtidos, a ACBC-3h e a ACBC-10m apresentaram superfície específica acima de 300 m²/kg, mas a quantidade de partículas para tamanho aproximado de até 60 μm ficaram abaixo de 80%, apresentando 63% para a ACBC-3h e 51% para ACBC-

10m, o que não resultariam em propriedades pozolânicas, conforme parâmetros apresentados pelos autores. Para maior quantidade de partículas para tamanho de até 60 µm, a cinza residual necessitaria de maior tempo de moagem no moinho de bolas.

4.1.1. Caracterização da ACBC em Pastas com Hidróxido de Cálcio

Foi realizado um estudo de pastas constituídas por ACBC com hidróxido de cálcio, nas proporções apresentadas na Tabela 4.4. A mistura de referência não contém ACBC, possui quartzo moído (como material inerte) e aditivo. Já nas pastas com ACBC, o quartzo moído foi substituído em 100% e 50% para cada tipo de ACBC tratada, sendo adicionado aditivo superplastificante necessário para manter o índice de consistência normal das misturas em ± 10 mm do obtido para a pasta de referência.

Tabela 4.4 – Quantitativo de materiais para moldagem das pastas com hidróxido de cálcio

Material	REF (g)	CBC - R		CBC - 3h		CBC - 10m	
		100% (g)	50% (g)	100% (g)	50% (g)	100% (g)	50% (g)
Quartzo moído	200	-	100	-	100	-	100
Ca(OH) ₂	200	200	200	200	200	200	200
Água (0,48)	192	192	192	192	192	192	192
CBC	-	200	100	200	100	200	100
Aditivo	-	4	1,55	4	1,55	4	1,55

Da mesma forma, foram confeccionadas pastas de ACBC *in natura* com hidróxido de cálcio, que além de substituir a sílica em 50 e 100%, também se substituiu nas porcentagens de 25 e 75%.

Para cada mistura foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 2x4 cm, para serem ensaiados à compressão nas idades de 3, 7, 14, 28 e 60 dias. A Figura 4.4 apresenta a média dos resultados de resistência à compressão ao longo do tempo das pastas com ACBC tratadas com seus devidos desvios padrão.

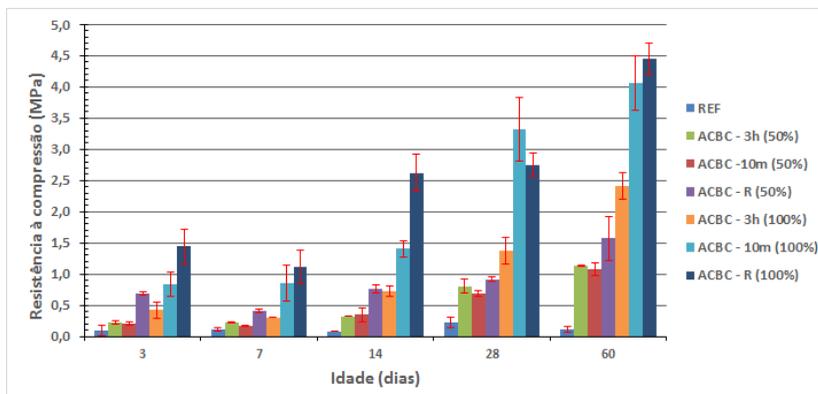


Figura 4.4 – Evolução da resistência à compressão das pastas de ACBC com hidróxido de cálcio

Dos resultados obtidos, a ACBC-R se destaca com valores de resistência maiores em comparação a ACBC-10m e ACBC-3h até aos 60 dias. Para as pastas com 50% de ACBC, a ACBC-10m e a ACBC-3h apresentaram resultados muito próximos de desempenho ao longo do tempo até aos 60 dias. Já para as pastas com 100% de ACBC, a ACBC-10m alcança valores altos de resistência, próximos aos obtidos pela ACBC-R até aos 60 dias

As Figuras 4.5 a 4.7 apresentam o efeito do tratamento das cinzas na evolução de resistência à compressão das pastas com hidróxido de cálcio com ACBC tratadas.

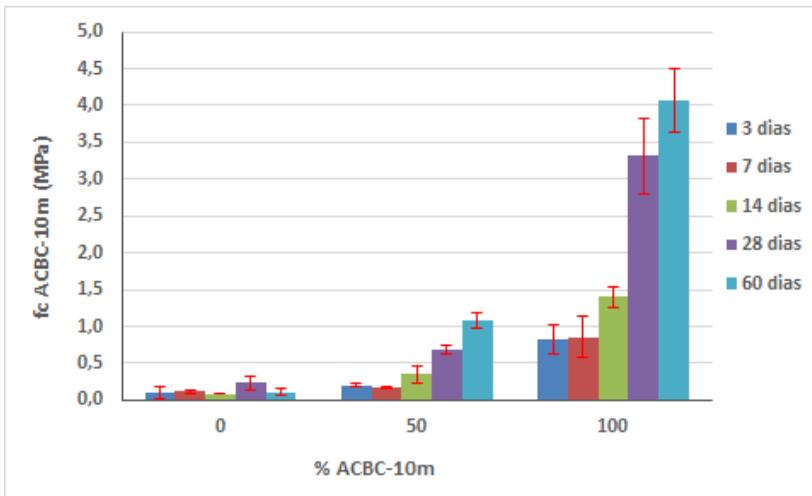


Figura 4.5 – Efeito do tratamento da ACBC-10m na evolução da resistência à compressão da pasta com hidróxido de cálcio

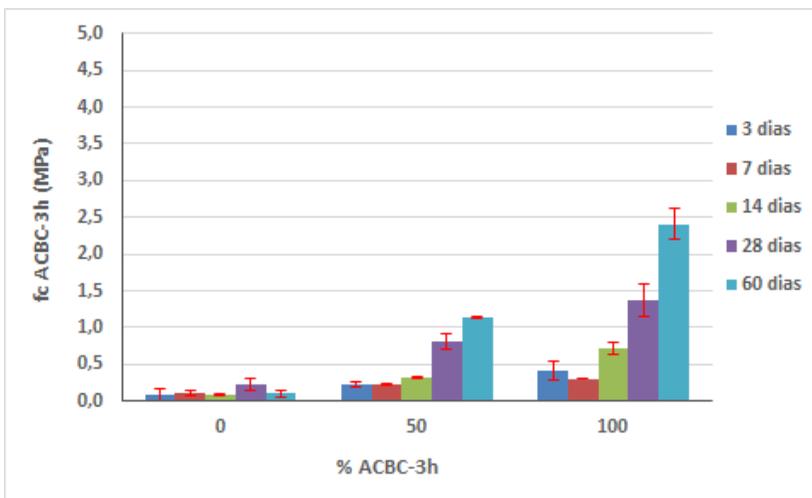


Figura 4.6 – Efeito do tratamento da ACBC-3h na evolução da resistência à compressão da pasta com hidróxido de cálcio

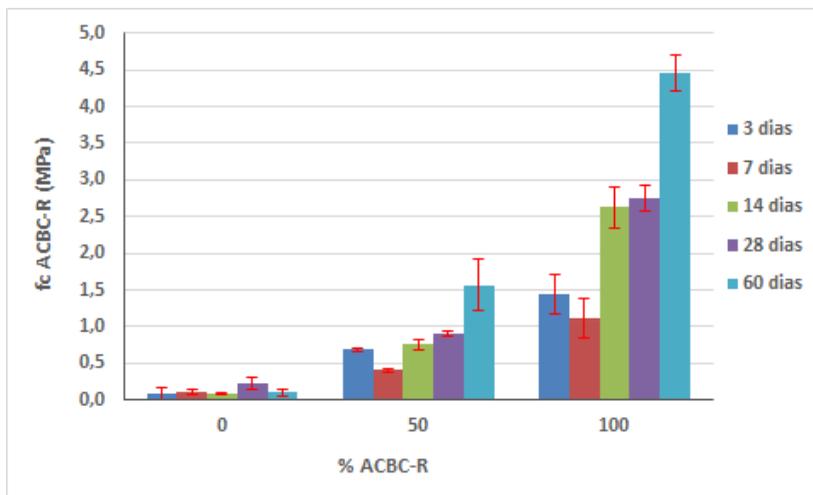


Figura 4.7 – Efeito do tratamento da ACBC-R na evolução da resistência à compressão da pasta com hidróxido de cálcio

Como esperado, a pasta de referência manteve a resistência baixa ao longo de todo o tempo, pois o quartzo moído, que é um material inerte, não reage com o hidróxido de cálcio. Quanto às pastas com substituição do quartzo moído por ACBC, a resistência à compressão aumenta gradativamente ao longo do tempo, com resistências superiores para as pastas com substituição de 100%. O aumento de resistência à compressão a partir dos 28 dias indica um provável efeito pozolânico, devido às reações com o hidróxido de cálcio continuarem ocorrendo em idades avançadas. No geral, as maiores resistências foram alcançadas nas pastas contendo 100% de ACBC-R e 100% de ACBC-10m.

A Figura 4.8 apresenta a composição mineralógica dos sólidos presentes nas pastas de hidróxido de cálcio, mostrando o efeito da reação de SiO_2 na idade de 28 dias. A fase de quartzo correspondente a SiO_2 é reduzida nas pastas de hidróxido de cálcio com ACBC, o que praticamente desaparece na ACBC-R. As reações acontecem entre a fase amorfa da cinza e os íons Ca do hidróxido de cálcio hidratado. Uma nova forma é identificada a $2\theta = 11,63$ que pode ser atribuída à C-A-H.

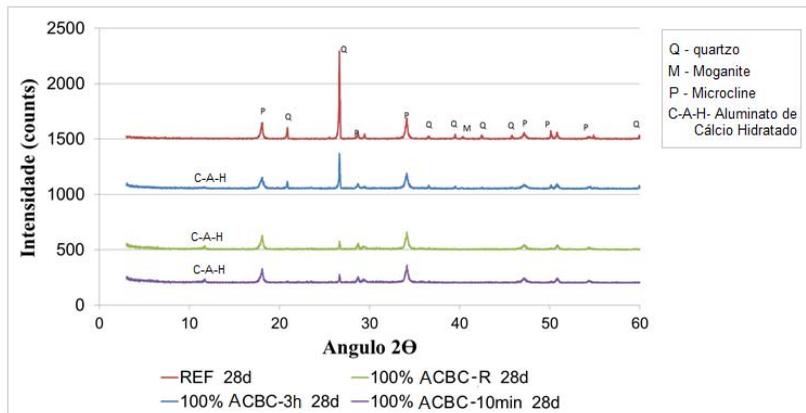


Figura 4.8 – Difratoograma de raios X da pasta de hidróxido de cálcio com ACBC aos 28 dias

A comparação dos difratogramas mostra claramente que a intensidade do pico correspondente à fase SiO_2 diminui com uso da ACBC-3h e ACBC-R já na idade de 28 dias, sendo mais importante para as cinzas de requeima e moagem de 10 minutos. Ou seja, teve-se um efeito pozolânico e formação do produto C-A-H (aluminato de cálcio hidratado), indicando que Si e Al presentes nas areias de cinzas participaram da reação. Quando íons Ca^{+2} entram em contato com os monossilicatos e aluminatos dissolvidos, C-S-H e C-A-H são formados, sendo que o C-S-H se forma mais facilmente em função da maior velocidade de dissolução dos silicatos, ao contrário do C-A-H que precipita na solução dos poros (TAYLOR, 1997).

Cherif, Rocha e Péra (1999) afirmam que a reação pozolânica acontece lentamente, acelerando gradualmente e torna-se importante a partir dos 28 dias. Com isso, leituras de fluxo de calor com DSC (calorimetria de varredura diferencial) foram realizadas nas pastas de hidróxido de cálcio com ACBC *in natura* aos 28 dias e os resultados estão apresentados na Figura 4.9.

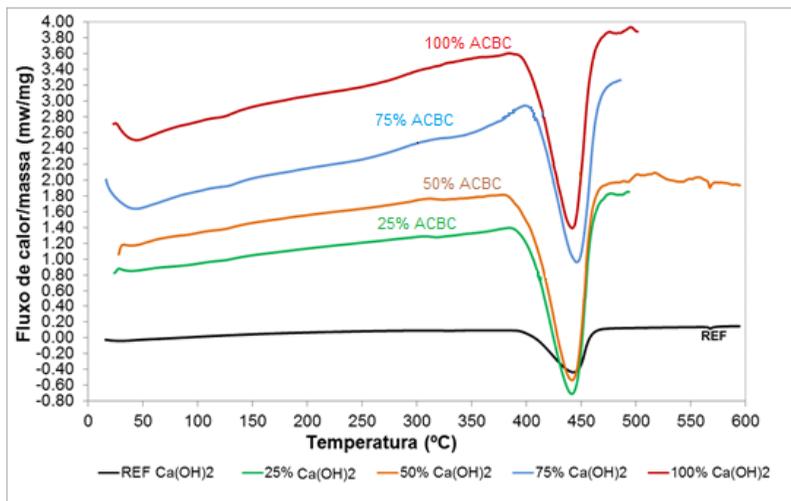


Figura 4.9 – DSC para pasta de hidróxido de cálcio com ACBC in natura aos 28 dias

Com estas leituras pode-se identificar mudanças de fase sem que haja variação de massa. De acordo com Ghorbel e Samet (2013), que estudaram o efeito pozolânico em misturas cimentícias, o efeito endotérmico que ocorre entre 450 e 550°C é causado pela decomposição da portlandita. Na pasta estudada, o efeito endotérmico ocorreu entre 400 e 500°C, mostrando que a ACBC possui provável efeito pozolânico devido à decomposição da portlandita. A banda endotérmica é bastante representativa. Embora como produto de hidratação tenha-se identificado C-A-H, na análise de decomposição termogravimétrica não se pode identificar este composto. Taylor (1990) sugeriu que, para tanto, fossem empregadas outras técnicas, como a QAX.

4.2. CONCRETOS COM AREIAS DE CINZAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Para facilitar a apresentação dos resultados e as análises, foi adotada uma nomenclatura especial para cada mistura de concreto estudada, conforme apresentado na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Nomenclatura adotada aos concretos deste programa experimental

Ref	Concreto de referência
20% ACBC-10m	Substituição de 20% dos agregados miúdos por ACBC-10m
20% ACBC-3h	Substituição de 20% dos agregados miúdos por ACBC-3h
10% ACBC-10m	Substituição de 10% dos agregados miúdos por ACBC-10m
10% ACBC-3h	Substituição de 10% dos agregados miúdos por ACBC-3h
10% ACBC-R	Substituição de 10% dos agregados miúdos por ACBC-R
5% ACBC-10m	Substituição de 5% dos agregados miúdos por ACBC-10m
5% ACBC-3h	Substituição de 5% dos agregados miúdos por ACBC-3h
5% ACBC-R	Substituição de 5% dos agregados miúdos por ACBC-R

4.2.1. Trabalhabilidade dos Concretos

Para a produção dos concretos, foi fixado o abatimento em 8 ± 2 cm (*slump test*), mantendo-se a mesma trabalhabilidade para todas as misturas testadas. A Figura 4.10 apresenta os resultados das relações a/c obtidas.

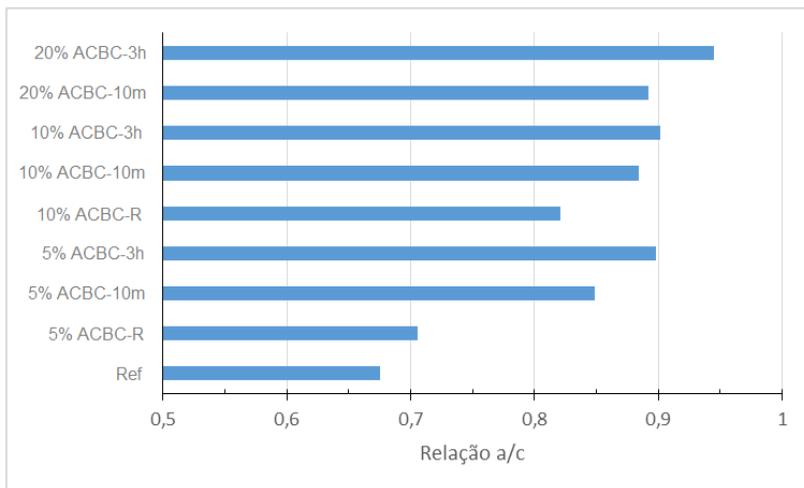


Figura 4.10 – Comparação das relações a/c para manter-se a trabalhabilidade em 8 ± 2 cm nas diferentes misturas de concreto

As misturas de concreto com substituição parcial dos agregados miúdos por ACBC com diferentes tratamentos apresentaram relações a/c maiores que a mistura de referência para manter a mesma trabalhabilidade. Indiferente da porcentagem de adição de cinza entre os tipos de tratamento, o concreto com areia de cinza requeimada, ACBC-R, teve a menor relação a/c, seguido pelo concreto com ACBC-10m. As misturas com ACBC-3h foram as que demandaram mais água.

As maiores relações a/c, para se manter a trabalhabilidade nas misturas, deve-se a menor granulometria da areia de cinzas em relação aos finos presentes nos agregados miúdos. As areias de cinzas não sofrem combustão completa na usina e, por consequência, possuem grande quantidade de material orgânico, conferindo menor trabalhabilidade e demandando maior quantidade de água nas misturas. No caso da ACBC-10m, pode-se postular que a moagem não foi o suficiente para cominuir as partículas orgânicas, que são maiores em relação as partículas minerais, ocasionando maior atrito entre as partículas e diminuindo a trabalhabilidade da massa. Esta possível ocorrência também explica as menores relações a/c observados para as misturas ACBC-R em relação às outras misturas com areia de cinza, visto que a requeima possibilita uma menor quantidade de carbono incombusto. A ACBC-3h demandou maior quantidade de água que a ACBC-10m, visto que possui maior quantidade de finos proporcionado pelo tempo maior de moagem.

4.2.2. Velocidade dos Pulsos Ultrassônicos nos Concretos

Os resultados de velocidade dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo, obtidos nas diferentes misturas de concreto, estão apresentados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

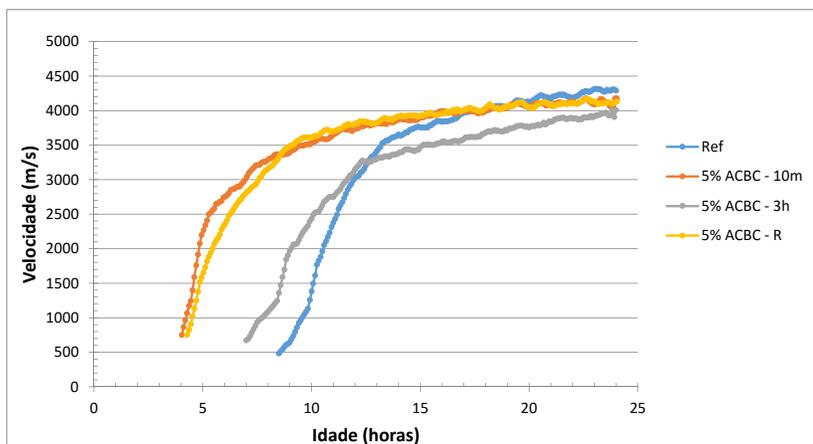


Figura 4.11 – Velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo para misturas de concreto com 5% de ACBC

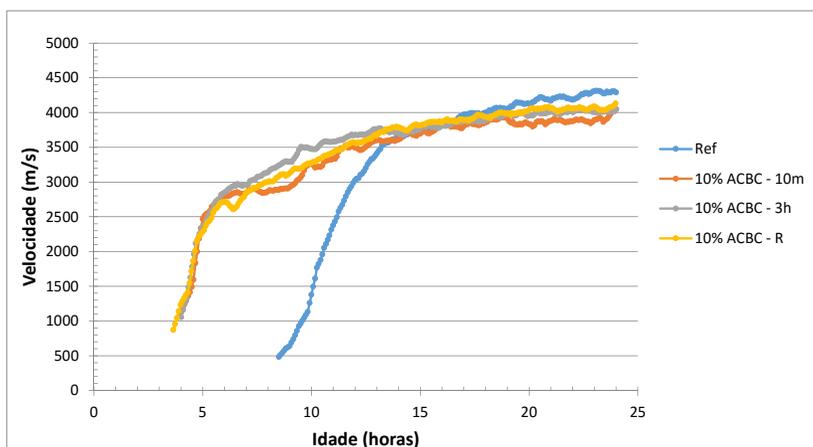


Figura 4.12 – Velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo para misturas de concreto com 10% de ACBC

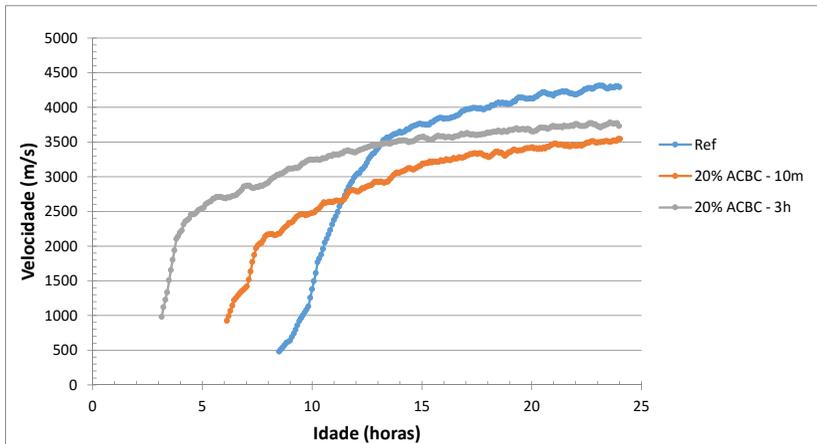


Figura 4.13 – Velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do tempo para misturas de concreto com 20% de ACBC

Para eliminar os efeitos das diferentes temperaturas na análise dos resultados, utilizou-se o conceito de idade equivalente. Para isso, as temperaturas dos concretos foram monitoradas paralelamente às leituras de VPU. As temperaturas de cada mistura durante as primeiras 24 horas estão apresentadas nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

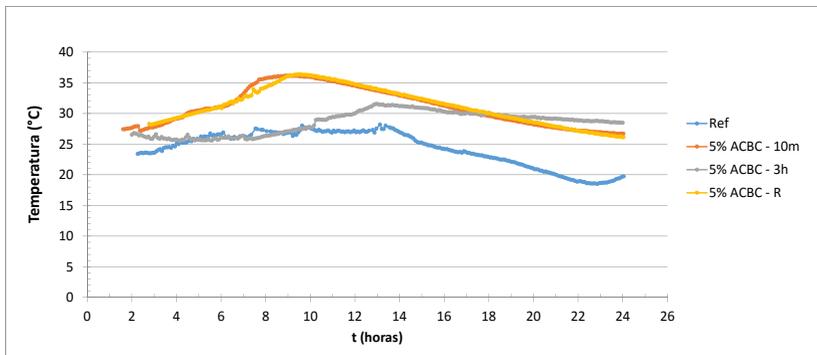


Figura 4.14 – Temperaturas ao longo do tempo em misturas de concreto com relação $a/c = 0,44$

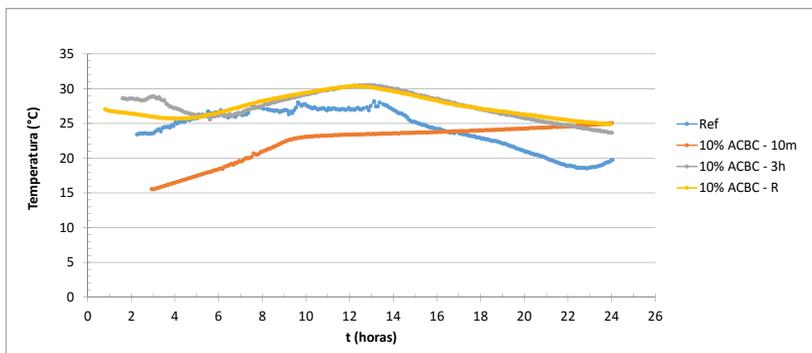


Figura 4.15 – Temperaturas ao longo do tempo em misturas de concreto com relação $a/c = 0,48$

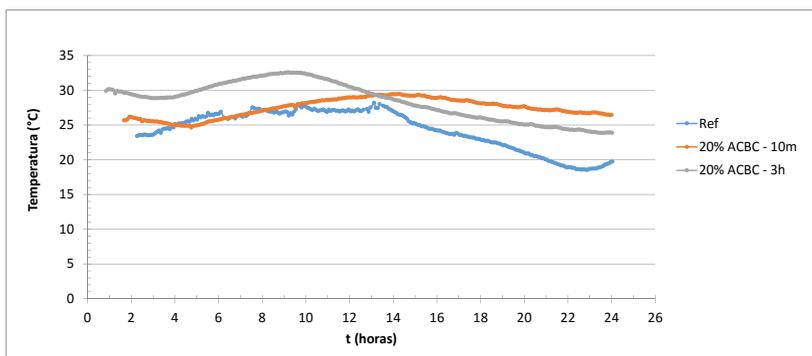


Figura 4.16 – Temperaturas ao longo do tempo em misturas de concreto com relação $a/c = 0,52$

Compensando o efeito de temperatura para alcançar uma análise mais precisa, funções de maturidade foram utilizadas para transformar idade real em idade equivalente (t_e). As leituras de VPU ao longo do tempo foram transformadas em idades equivalentes à temperatura constante de 20°C. As figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os resultados obtidos.

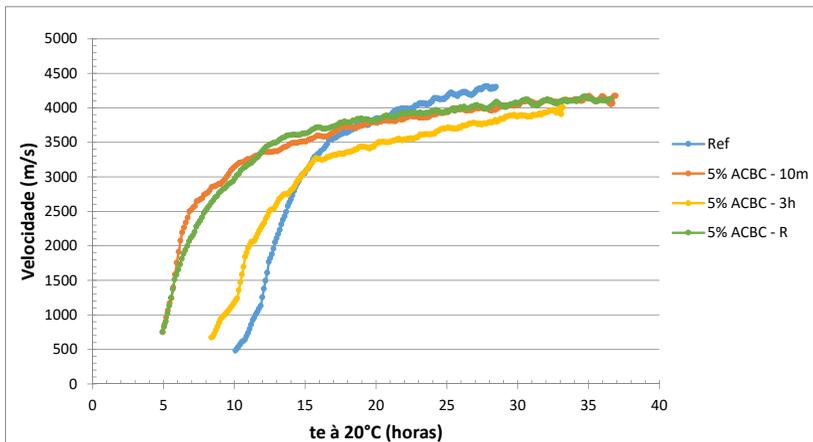


Figura 4.17 – VPU para te à 20°C nos concretos com 5% de ACBC

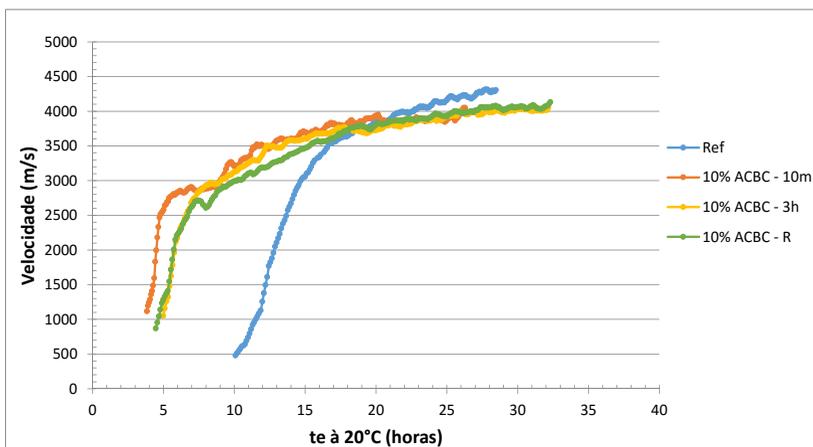


Figura 4.18 – VPU para te à 20°C nos concretos com 10% de ACBC

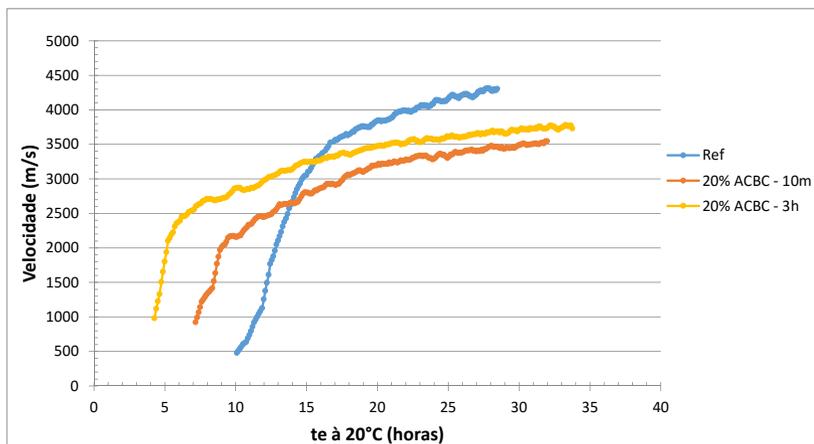


Figura 4.19 – VPU para te à 20°C nos concretos com 20% de ACBC

Os resultados deste estudo de adição de ACBC em misturas de concreto mostra a influência da areia de cinza no processo de hidratação. A ACBC no concreto acelera o desenvolvimento das velocidades dos pulsos ultrassônicos nos tempos de pega em relação a mistura de referência (sem areia de cinza). Quanto aos diferentes tratamentos da ACBC, a análise da eficácia de cada uma fica inconclusiva, pois os resultados não seguem um padrão capaz de indicar qual tratamento fornece maior aceleração no endurecimento das misturas, pois diferentes relações a/c inferem no comportamento, com características diferentes para cada mistura. A influência da relação a/c pode ser notada ao comparar as maiores velocidades das ondas ultrassônicas alcançadas para cada mistura, pois quanto menor a relação a/c, maiores foram as velocidades alcançadas, até às 24 horas de monitoramento, provavelmente pela melhor compactidade destas misturas, na qual a mistura de referência se sobressai.

4.2.3. Resistência à Compressão dos Concretos

A Tabela 4.6 apresenta os resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias das misturas de concreto.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão média aos 28 dias das misturas de concreto

Mistura	Fc 28 dias (MPa)							
	0% ACBC	DV	5% ACBC	DV	10% ACBC	DV	20% ACBC	DV
Referência	38,8	0,70	-	-	-	-	-	-
ACBC - 10m	-	-	26,3	0,57	21,5	0,52	16,7	0,90
ACBC - 3h	-	-	32,1	0,47	22,1	0,53	18,2	0,62
ACBC - R	-	-	32,6	1,30	24,2	1,10	-	-

A adição de ACBC nas misturas de concreto em substituição de 5, 10 e 20% dos agregados miúdos resultou em menor resistência à compressão aos 28 dias, em comparação ao concreto de referência, devido às maiores relações a/c. Os melhores resultados de resistência à compressão foram alcançados pelas misturas com 5% ACBC-R e 5% ACBC-3h, com 84% e 83% da resistência à compressão do concreto de referência.

4.3. ARGAMASSAS COM AREIAS DE CINZAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Foi adotada uma nomenclatura especial para cada mistura de argamassa estudada, conforme apresentado na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Nomenclatura adotada para as argamassas deste programa experimental

Ref (0,44)	Argamassa de referência com relação a/c = 0,44
Ref (0,48)	Argamassa de referência com relação a/c = 0,48
Ref (0,52)	Argamassa de referência com relação a/c = 0,52
ACBC-10m (0,44)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-10m e relação a/c = 0,44
ACBC-10m (0,48)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-10m e relação a/c = 0,48
ACBC-10m (0,52)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-10m e relação a/c = 0,52
ACBC-3h (0,44)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-3h e relação a/c = 0,44
ACBC-3h (0,48)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-3h e relação a/c = 0,48
ACBC-3h (0,52)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-3h e relação a/c = 0,52

Continua

Continuação

ACBC-R (0,44)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-R e relação a/c = 0,44
ACBC-R (0,48)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-R e relação a/c = 0,48
ACBC-R (0,52)	Substituição de 7,5% dos agregados miúdos (finos) por ACBC-R e relação a/c = 0,52

4.3.1. Trabalhabilidade dos Concretos

Os índices de consistência das argamassas frescas aumentaram com o aumento da relação água/cimento, tanto para as misturas com ACBC como para as de referência. Os melhores índices de consistência foram apresentados pelas misturas de referência. Em relação às argamassas de referência, as argamassas com ACBC-10m apresentaram, em média, consistência 23% menores. Já as argamassas com ACBC-3h tiveram consistência, em média, 15% menores, enquanto que as argamassas com ACBC-R tiveram o desempenho da consistência, em média, 9% menores. A Figura 4.20 apresenta os resultados obtidos.

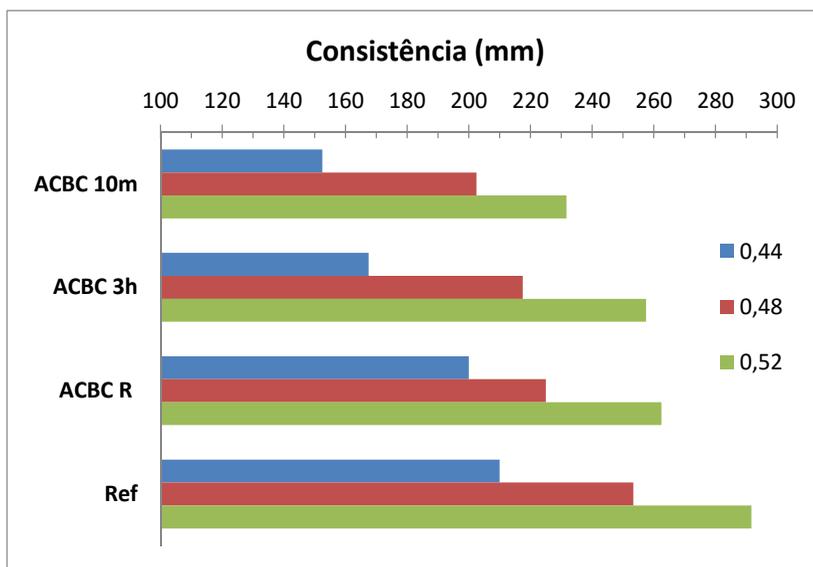


Figura 4.20 – Índices de consistência das misturas de argamassas conforme ASTM C 230 (2014)

Os menores índices de consistência apresentados pelas argamassas com ACBC indicam que a cinza possui maior área superficial em relação aos finos presentes nos agregados miúdos, conseqüentemente há maior necessidade de água para molhamento. Entretanto, as misturas com ACBC-3h não apresentaram menores índices de consistência do que as misturas com ACBC-10m. Porém, as areias de cinzas não sofrem combustão completa na usina e por conseqüência possuem grande quantidade de material orgânico, conferindo menor trabalhabilidade das partículas e demandando maior quantidade de água nas misturas. No caso da ACBC-10m, pode-se postular que a moagem não foi o suficiente para cominuir as partículas orgânicas, na forma de matérias carbonosas, ocasionando maior atrito entre elas e diminuindo a trabalhabilidade da massa. Esta possível ocorrência também explicaria os maiores índices de consistência observados para as misturas ACBC-R em relação às outras misturas com areia de cinza. A requeima possibilitaria uma menor quantidade de carbono incombusto.

4.3.2. Monitoramento das Temperaturas nas Argamassas Frescas

As temperaturas de cada mistura de argamassa no estado fresco, durante as primeiras 24 horas, estão apresentadas nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23.

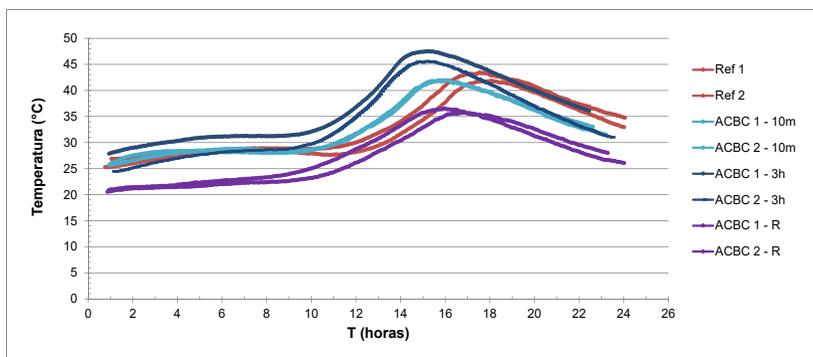


Figura 4.21 – Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,44$

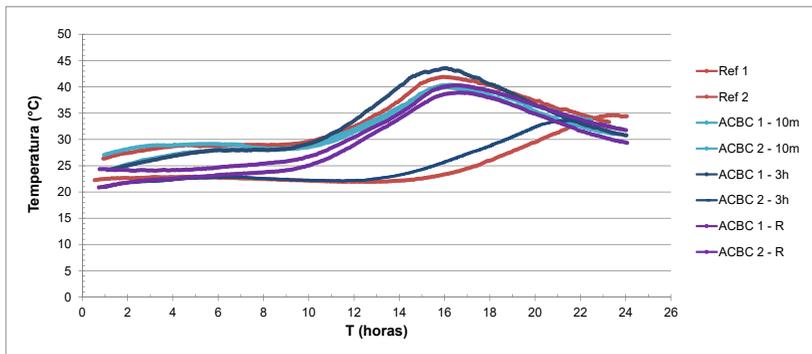


Figura 4.22 – Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,48$

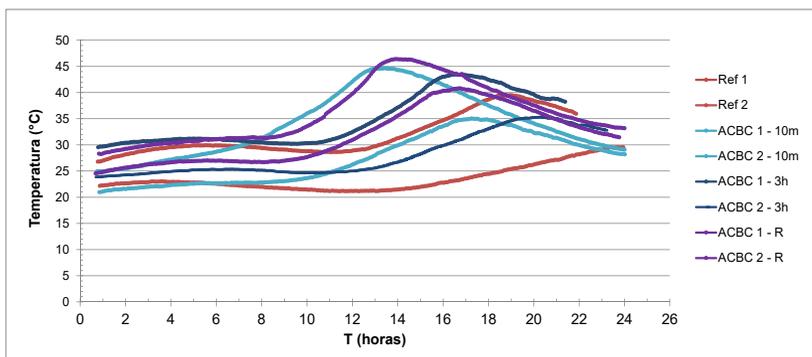


Figura 4.23 – Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,52$

Como não houve controle da temperatura ambiente, ocorrendo variações das temperaturas ao longo do tempo em que foi executada esta etapa experimental. Para compensar o efeito de temperatura para uma análise mais precisa dos resultados, funções de maturidade foram utilizadas para transformar idade real em idade equivalente (t_e) para uma temperatura de 20°C.

4.3.3. Início e Fim de Pega das Argamassas pelo Método de Resistência à Penetração

A Tabela 4.8 apresenta os tempos de início e fim de pega (em horas), determinados pelo método de resistência à penetração, com o Penetrômetro de Proctor, para as diferentes misturas de argamassas.

Tabela 4.8 – Tempos de início de pega (I.P.) e fim de pega (F.P.) das argamassas obtidos pelo método de resistência à penetração

Mistura	Mistura (0,44)		Mistura (0,48)		Mistura (0,52)	
	I. P. (h)	F. P. (h)	I. P. (h)	F. P. (h)	I. P. (h)	F. P. (h)
Ref 1	11,2	12,7	9,9	11,6	11,4	13,9
Ref 2	12,0	13,8	12,4	16,0	12,5	15,5
ACBC 1 – 10m	7,7	10,5	8,5	11,9	7,5	9,2
ACBC 2 – 10m	9,1	11,8	9,4	11,2	9,6	11,9
ACBC 1 – 3h	7,8	11,1	9,2	11,7	9,8	11,8
ACBC 2 – 3h	8,7	10,7	13,3	16,2	12,5	16,0
ACBC 1 – R	8,5	10,3	8,8	10,8	8,9	10,4
ACBC 2 – R	9,5	11,5	9,4	11,4	10,0	12,1

Compensando o efeito de temperatura para alcançar uma análise mais precisa, funções de maturidade foram utilizadas para transformar idade real em idade equivalente (t_e). Sendo assim, os tempos de pega apresentados foram recalculados a partir do histórico de temperatura de cada mistura, utilizando-se a Equação 3.1 com energia de ativação de 30 kJ/mol. A Tabela 4.9 apresenta os resultados de idade equivalente para início e fim de pega nas argamassas, obtidas com o penetrômetro.

Tabela 4.9 – Tempos de início de pega (I.P.) e fim de pega (F.P.) das argamassas para idade equivalente à 20°C obtidos pelo método de resistência à penetração

Mistura	Mistura 0,44 (h)				Mistura 0,48 (h)				Mistura 0,52 (h)			
	I. P.	Média	F. P.	Média	I. P.	Média	F. P.	Média	I. P.	Média	F. P.	Média
Ref 1	15,3	15,7	17,6	18,1	13,5	13,6	16,1	16,9	16,1	14,8	19,8	18,3
Ref 2	16,1		18,7		13,7		17,6		13,5		16,8	
ACBC 1 - 10m	10,3	11,2	14,1	15,1	11,6	11,9	16,7	15,7	9,7	10,1	12,6	13,0
ACBC 2 - 10m	12,1		16,1		12,2		14,7		10,5		13,3	
ACBC 1 - 3h	11,4	11,4	15,0	14,7	11,9	13,2	15,5	16,8	14,0	14,5	17,8	18,8
ACBC 2 - 3h	11,3		14,4		14,6		18,1		15,0		19,9	
ACBC 1 - R	9,2	9,7	11,5	12,0	10,4	10,5	13,0	13,1	13,2	13,0	15,6	15,7
ACBC 2 - R	10,2		12,5		10,6		13,1		12,8		15,9	

Percebe-se que os resultados apresentados na Tabela 4.8, diferentemente dos apresentados na Tabela 4.7, possuem menores variações entre tempos de início e fim de pega para uma mesma mistura. Sem a consideração do efeito de temperatura, por exemplo, as misturas com relação água cimento de 0,52 e areia de cinza moída por 10 minutos (ACBC–10m, a/c 0,52) apresentaram tempos de início de pega de 7,5 e 9,6 horas. Por outro lado, considerando o efeito da temperatura, estes valores se situaram entre 9,7 e 10,5 horas a 20°C.

Os resultados indicam que as misturas com areias de cinzas aceleraram a pega, já que os tempos de início e fim de pega foram menores que os das misturas de referência, com exceção da mistura ACBC–3h e a/c de 0,48 e 0,52, onde os dados foram similares. Estes resultados demonstram que as areias de cinzas adicionadas nas misturas, independente do tratamento utilizado, são mais reativas e tendem a acelerar a pega das argamassas. A requeima da areia de cinza foi o tratamento que resultou em uma maior aceleração. Quanto à relação a/c, de acordo com os resultados apresentados, a tendência é de aumentar o tempo de pega quanto maior a relação utilizada, indicando menor reatividade das misturas com o aumento de água.

4.3.4. Velocidade dos Pulsos Ultrassônicos nas Argamassas

Os resultados de velocidade das ondas ultrassônicas ao longo do tempo, obtidos nas diferentes misturas de argamassas, estão apresentadas nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26.

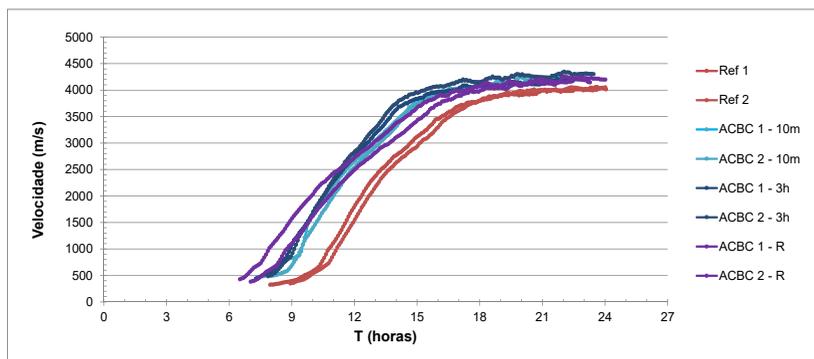


Figura 4.24 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para argamassas com a/c = 0,44

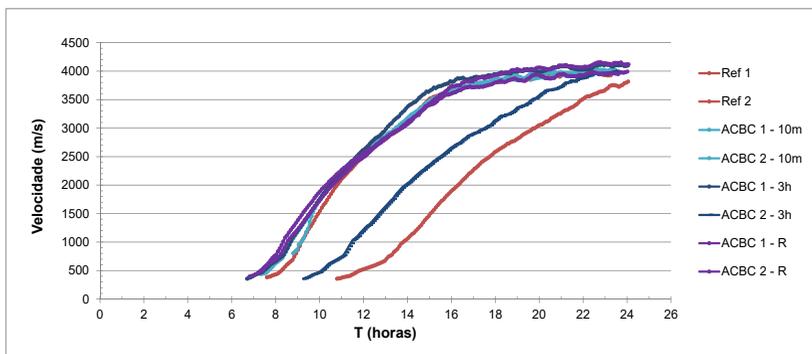


Figura 4.25 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para argamassas com $a/c = 0,48$

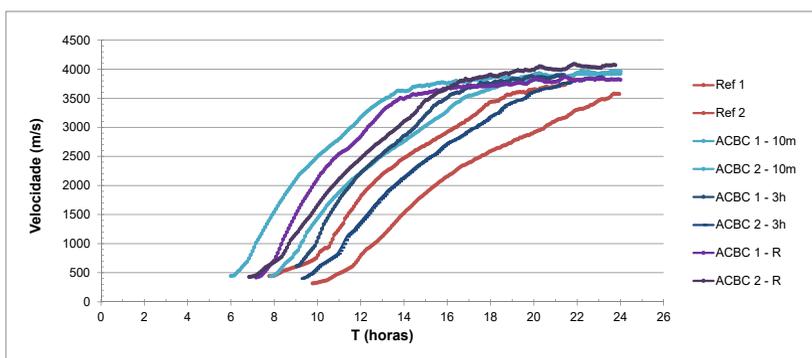


Figura 4.26 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para argamassas com $a/c = 0,52$

De forma similar aos tempos de pega pelo método da resistência à penetração, as leituras de velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo foram transformadas em idades equivalentes à temperatura constante de 20°C. As figuras 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam os resultados obtidos.

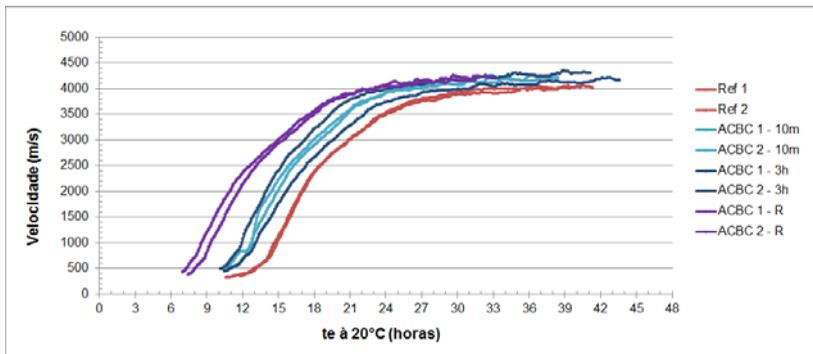


Figura 4.27 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para t_e à 20°C nas argamassas com $a/c = 0,44$

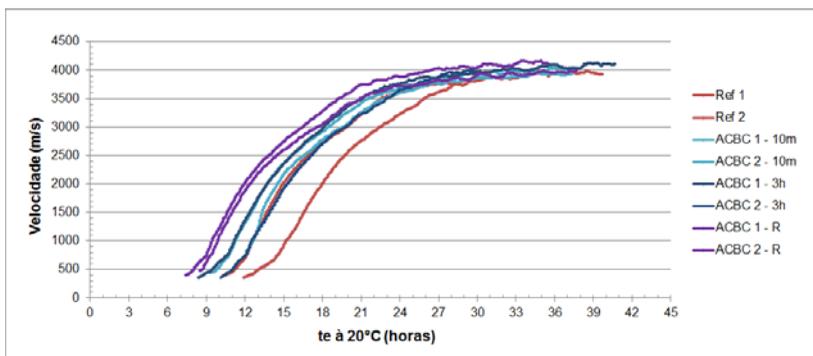


Figura 4.28 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para t_e à 20°C nas argamassas com $a/c = 0,48$

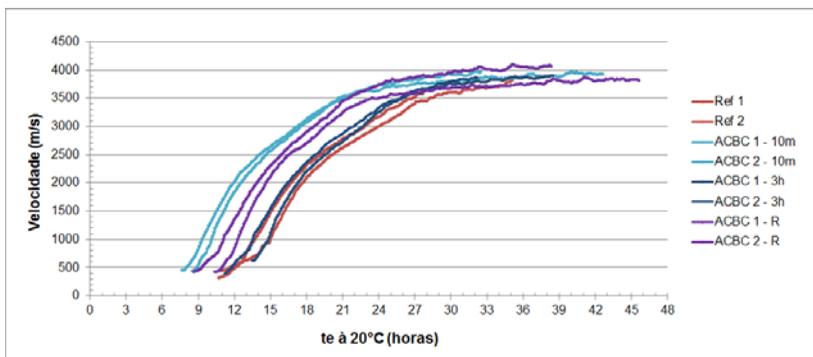


Figura 4.29 – Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo para t_e à 20°C nas argamassas com $a/c = 0,52$

Como já descrito, para cada tipo de argamassa foram realizados os experimentos em duplicata, para confirmação dos resultados obtidos, implicando em temperaturas diferentes para cada um. Após a determinação das idades equivalentes, as curvas de cada tipo de argamassa ficaram próximas, tornando fácil a identificação do comportamento de cada tipo de mistura durante o processo de hidratação das argamassas no estado fresco, deixando clara a influência da ACBC e seus diferentes tratamentos no processo de hidratação das argamassas estudadas.

Os resultados de velocidades das ondas ultrassônicas estão de acordo com os resultados do ensaio de penetração, visto que as misturas com cinzas aceleraram o desenvolvimento das velocidades ultrassônicas e, portanto, o processo de hidratação das argamassas em relação às misturas de referência (sem cinza).

Quanto aos tratamentos realizados nas areias de cinzas, para as relações a/c de 0,44 e 0,48, a requeima foi novamente o tratamento que resultou em uma maior aceleração no processo.

Para a relação a/c de 0,52, a moagem por 10 min resultou uma maior aceleração do que a requeima, indicando que a relação a/c interfere nos resultados de aceleração da pega, pela interação da granulometria no efeito de empacotamento das partículas e reações de hidratação na presença de ACBC. De acordo com Lawrence, Cyr e Ringot (2003), o efeito da distribuição granulométrica, que depende da granulometria e da quantidade de adição mineral usada, está relacionado com a modificação da porosidade inicial da mistura.

4.3.5. Resistência à Compressão das Argamassas

Na Tabela 4.10 estão os resultados médios de resistência à compressão até a idade de 60 dias, assim como, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV), para cada tipo de argamassa testada.

Tabela 4.10– Resistência à compressão das misturas de argamassa

Idade	Mistura	F _c (MPa)								
		0,44			0,48			0,52		
		Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV
3 dias	Ref	37,4	3,6	0,10	34,8	3,3	0,10	27,1	1,7	0,06
	ACBC - 10m	40,0	2,8	0,07	33,3	2,5	0,08	33,6	3,8	0,11
	ACBC - 3h	39,2	5,2	0,13	34,8	3,2	0,09	32,9	3,8	0,11
	ACBC - R	33,3	2,0	0,06	35,6	1,7	0,05	29,1	2,3	0,08
7 dias	Ref	39,0	4,2	0,11	34,1	2,1	0,06	31,9	4,0	0,13
	ACBC - 10m	49,1	4,3	0,09	35,6	3,4	0,10	34,0	1,5	0,05
	ACBC - 3h	45,6	4,0	0,09	42,6	2,8	0,07	37,4	2,0	0,05
	ACBC - R	45,8	6,3	0,14	41,6	2,3	0,06	37,9	2,5	0,07
14 dias	Ref	44,1	4,4	0,10	38,8	3,5	0,09	36,5	4,0	0,11
	ACBC - 10m	54,2	5,0	0,09	40,7	2,8	0,07	39,3	4,5	0,11
	ACBC - 3h	49,0	2,4	0,05	45,6	2,6	0,06	42,0	2,3	0,06
	ACBC - R	48,9	3,5	0,07	45,2	3,2	0,07	46,2	1,9	0,04
28 dias	Ref	45,2	1,0	0,02	43,7	2,2	0,05	42,1	2,7	0,06
	ACBC - 10m	52,1	1,7	0,03	47,7	0,3	0,01	43,1	2,5	0,06
	ACBC - 3h	53,8	2,0	0,04	48,4	1,7	0,04	46,1	4,6	0,10
	ACBC - R	54,1	1,6	0,03	48,8	2,4	0,05	46,4	3,6	0,08
60 dias	Ref	43,7	3,0	0,07	45,9	1,2	0,03	42,7	3,4	0,08
	ACBC - 10m	54,7	4,4	0,08	46,8	4,1	0,09	43,4	4,4	0,10
	ACBC - 3h	57,6	5,1	0,09	48,1	1,6	0,03	45,3	2,1	0,05
	ACBC - R	54,9	2,2	0,04	51,1	3,6	0,07	50,3	2,8	0,06

As figuras 4.30, 4.31 e 4.32 apresentam os gráficos dos resultados da evolução da resistência à compressão média ao longo do tempo obtidos nas argamassas com a/c de 0,44, 0,48 e 0,52, respectivamente, com seus devidos desvios padrão.

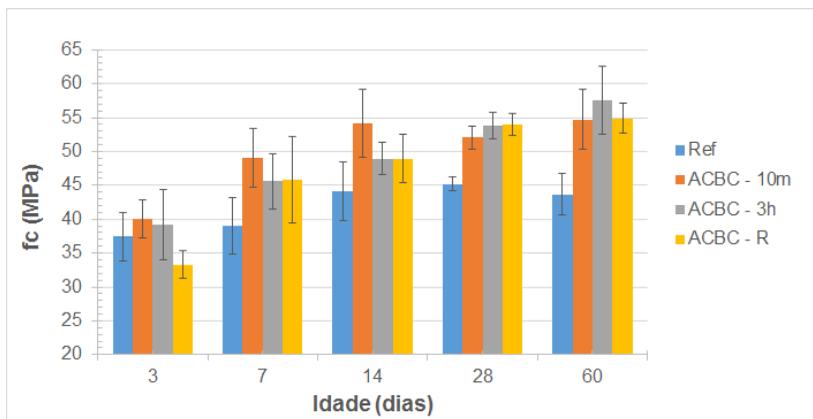


Figura 4.30 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo das argamassas com a/c = 0,44 contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos

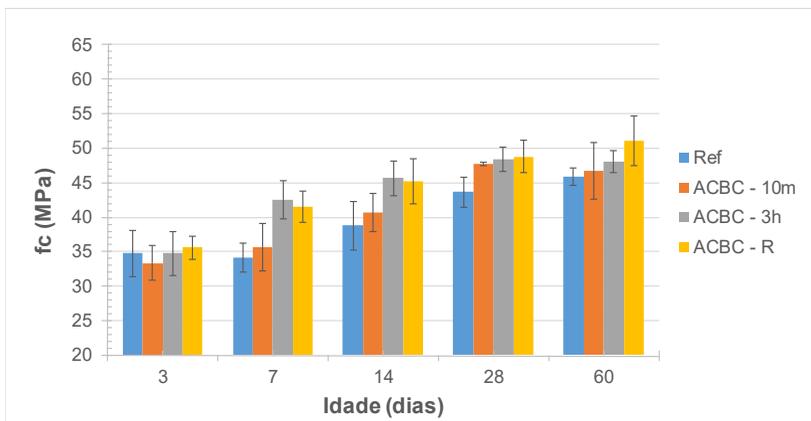


Figura 4.31 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo das argamassas com $a/c = 0,48$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos

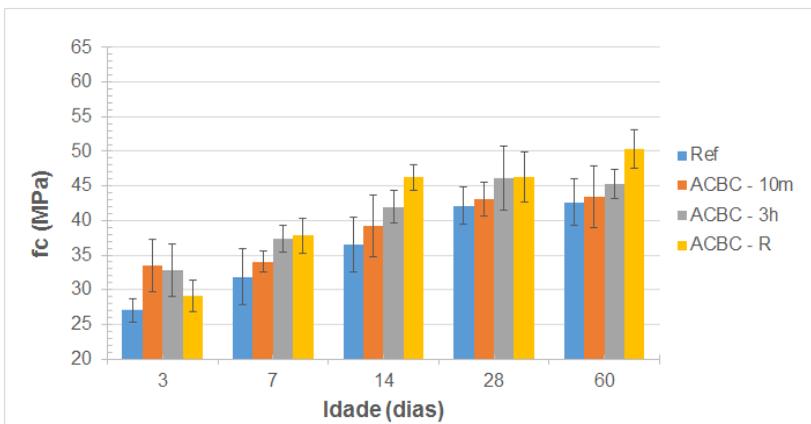


Figura 4.32 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo das argamassas com $a/c = 0,52$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos

Pela Análise de Variância (ANOVA), com o teste de Duncan, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que as misturas com relação a/c de 0,44 e 0,48, na idade de 28 dias, possuem diferenças significativas entre as resistências à compressão das argamassas com ACBC em relação a argamassa de referência. Já para os resultados de resistência à compressão na idade de 28 dias para a argamassa de $a/c=0,52$, apesar da argamassa de referência apresentar valores médios inferiores aos das

argamassas com ACBC, pelo teste de Duncan não se pode afirmar, com 95% de confiança, que exista diferença significativa entre os valores obtidos. Tal resultado da análise para $a/c=0,52$ deve a maior variabilidade dos resultados de resistência à compressão obtidos (ver análises estatísticas no Anexo 3).

Os valores maiores de resistência à compressão, obtidos pelas argamassas com ACBC em relação às argamassas sem ACBC, indicam o provável efeito pozolânico e de preenchimento proporcionados pelas cinzas estudadas. Também, quanto menor a relação a/c , maiores foram as diferenças entre as resistências à compressão alcançadas entre misturas com ACBC e mistura de referência, indicando que a quantidade de água nas misturas interfere na reatividade das cinzas residuais e que a cinza é indicada para uso em concreto de maiores resistências à compressão.

4.3.6. Correlações entre Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade Dinâmico

As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam os resultados de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) ao longo do tempo, para cada diferente tipo de argamassa. Para o cálculo dos módulos foram usadas as relações das Equação 2.1 e 2.2 apresentadas no item 2.3 deste documento. Conforme a Equação 2.1, a velocidade de propagação é diretamente proporcional à raiz quadrada do módulo dinâmico de elasticidade, possibilitando medições de velocidade para indiretamente avaliar a resistência à compressão, considerando que haja uma relação direta entre E_d e f_c . De acordo com Bungey, Millard e Grantham (2006), pode-se constatar que variações nos valores do coeficiente de Poisson entre 0,15 e 0,25 resultam numa variação do coeficiente k entre 1,06 e 1,20, respectivamente, e produzem variações de até 6,6% no valor da velocidade de pulsos ultrassônicos. Sendo assim, para a determinação de E_d foi adotado o valor de 0,20 para o coeficiente de Poisson, enquanto que para os valores de massa específica foram utilizados os obtidos para cada mistura de argamassa ensaiada.

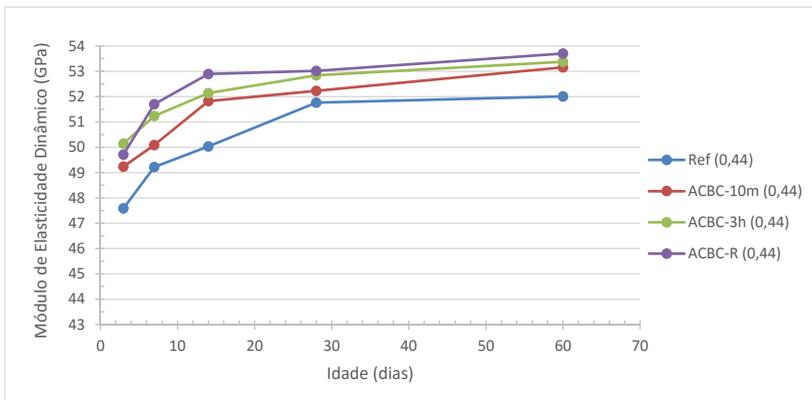


Figura 4.33 – Módulos de elasticidade dinâmicos ao longo do tempo para as diferentes misturas de argamassas com relação a/c de 0,44

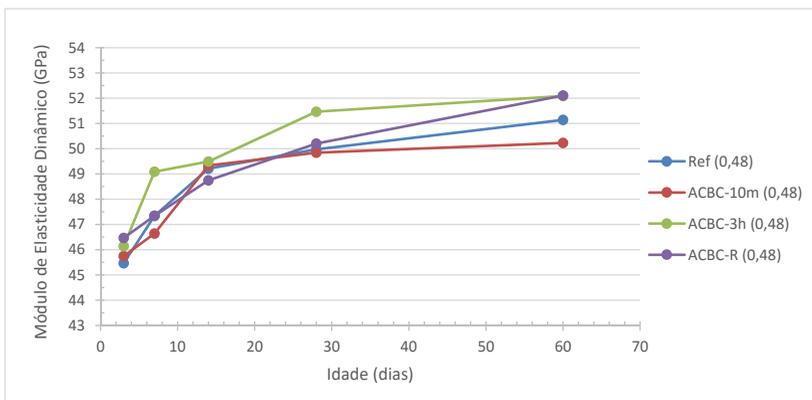


Figura 4.34 – Módulos de elasticidade dinâmicos ao longo do tempo para as diferentes misturas de argamassas com relação a/c de 0,48

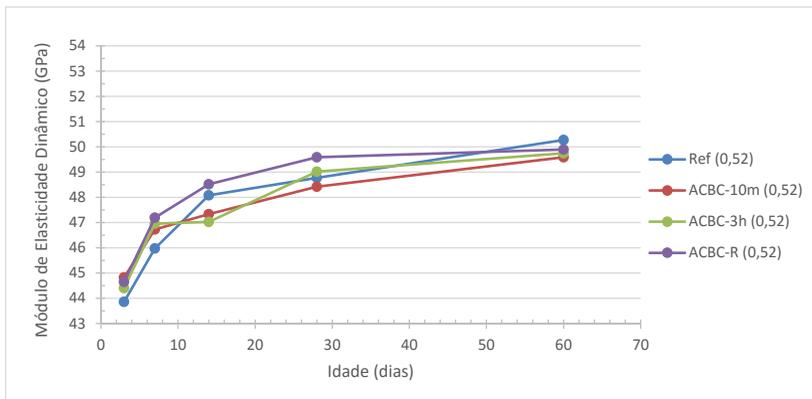


Figura 4.35 – Módulos de elasticidade dinâmicos ao longo do tempo para as diferentes misturas de argamassas com relação a/c de 0,52

Correlacionou-se os resultados de resistência à compressão com módulo de elasticidade dinâmico, ao longo do tempo, através de curvas exponenciais. Para as argamassas com a/c de 0,44 o coeficiente R^2 é de aproximadamente 0,72 (Figura 4.36), para as argamassas com a/c de 0,48 o R^2 é de 0,78 (Figura 4.37), enquanto que para a/c de 0,52 o R^2 é de 0,83 (Figura 4.38).

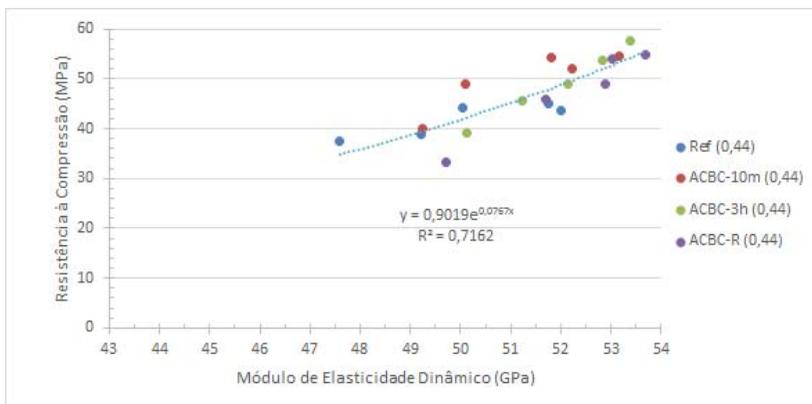


Figura 4.36 – Correlação exponencial entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas com a/c = 0,44 contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos

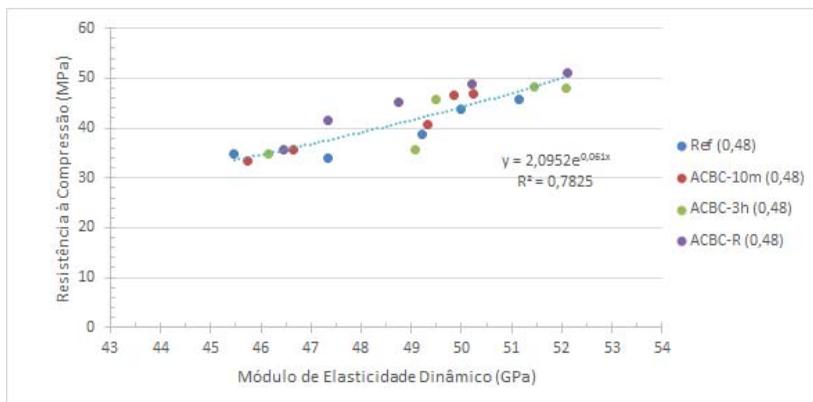


Figura 4.37 – Correlação exponencial entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas com $a/c = 0,48$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos

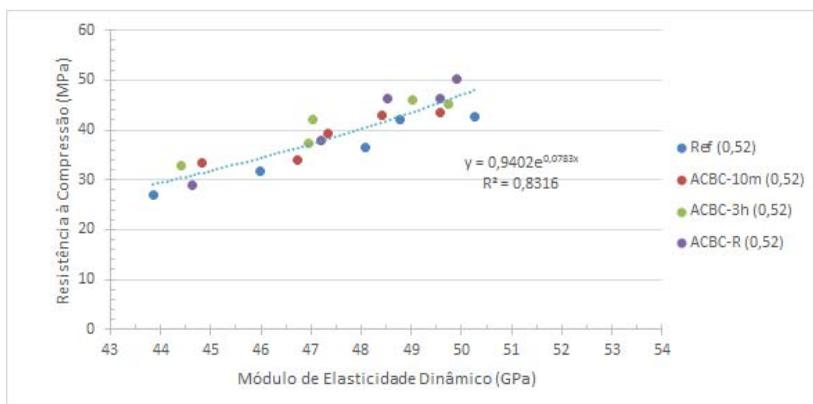


Figura 4.38 – Correlação exponencial entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas com $a/c = 0,52$ contendo ACBC em substituição aos agregados miúdos

As correlações exponenciais indicam o crescimento da resistência à compressão enquanto ocorre o aumento do módulo de elasticidade. De acordo com ACI COMMITTEE 228 (2003), no processo de endurecimento o módulo de elasticidade e a resistência crescem a diferentes taxas. O crescimento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor do que o crescimento da resistência à compressão. Sendo assim, a relação entre resistência à compressão e velocidade dos pulsos ultrassônicos não são lineares. Neville (1997)

também afirma que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, no entanto, sem uma dependência padrão entre eles.

Como descrito anteriormente, para todas as argamassas estudadas executou-se leituras de velocidades dos pulsos ultrassônicos nas primeiras 24 horas de idade e fez o cálculo de idade equivalente (t_e) para uma temperatura de 20°C. Como os ensaios à compressão foram realizados a partir de 3 dias de idade, a Tabela 4.11 apresenta as resistências à compressão das argamassas para 1 dia de idade, estimadas através das correlações entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão apresentadas nas figuras acima (Figuras 4.36 a 4.38).

Tabela 4.11 – Resistências à compressão estimadas com correlações entre VPU e f_c para idade de 1 dia

Argamassa	0,44			0,48			0,52		
	V (m/s)	Ed (Gpa)	f_c (MPa)	V (m/s)	Ed (Gpa)	f_c (MPa)	V (m/s)	Ed (Gpa)	f_c (MPa)
Ref	3513	29,77	8,8	3418	27,65	11,3	3080	22,45	5,5
ACBC-10m	3913	36,93	15,3	3649	31,51	14,3	3684	32,12	11,6
ACBC-3h	3854	35,82	14,1	3711	32,59	15,3	3293	25,67	7,0
ACBC-R	4046	39,49	18,6	3803	34,23	16,9	3624	31,09	10,7

A adição de ACBC nas misturas de argamassas em substituição dos 7,5% dos finos dos agregados miúdos resultou em uma maior resistência à compressão ao longo do tempo e um efeito acelerador no processo de hidratação do cimento em argamassas no estado fresco, conforme resultados de velocidade dos pulsos ultrassônicos e resistência à penetração. Já com os resultados apresentados na Tabela 4.10, a estimativa de resistência à compressão das argamassas para 1 dia de idade mostra que, com a adição de ACBC, não ocorre somente a aceleração da pega, mas também maior incremento de resistência em relação às argamassas de referência, com resistências à compressão estimadas variando aproximadamente de 1,3 à 2,1 vezes maiores nas argamassas com ACBC, sendo que, no geral, os melhores resultados foram apresentados pelas argamassas com a/c de 0,44 e misturas com ACBC-R.

Independente do processamento feito com a areia de cinza ou da relação a/c, essa aceleração no endurecimento pode trazer benefícios para diferentes aplicações em obras, principalmente para aquelas que requerem menor tempo de execução por necessidades estruturais ou cronogramas apertados.

4.3.7. Absorção de Água e Índice de Vazios

As figuras 4.39 a 4.41 apresentam a média dos resultados de absorção de água por capilaridade das idades de 3, 7, 14, 28 e 60 dias, para as diferentes argamassas. As leituras de absorção foram feitas com 3, 6, 24, 48 e 72 horas após o contato do corpo-de-prova com a lâmina de água.

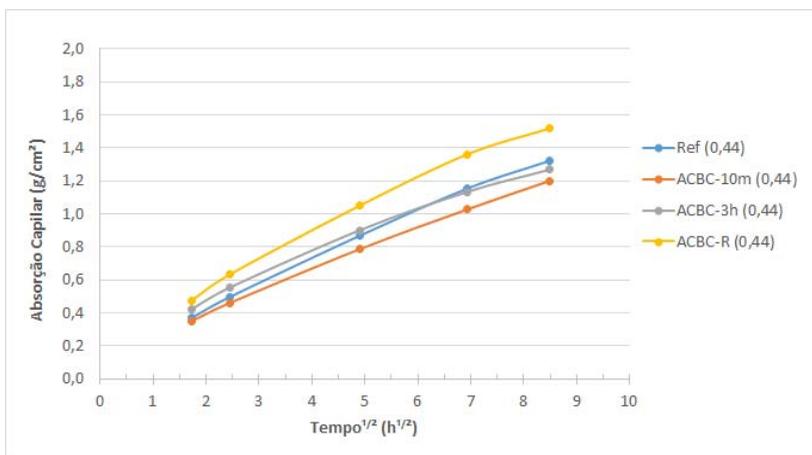


Figura 4.39 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas com a/c = 0,44

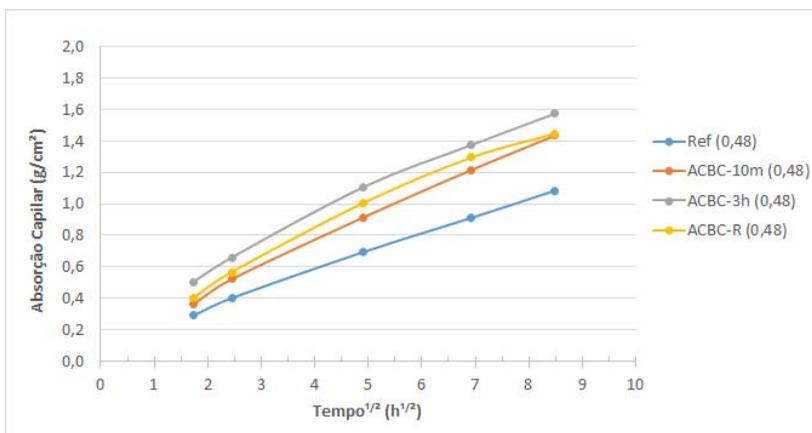


Figura 4.40 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas com a/c = 0,48

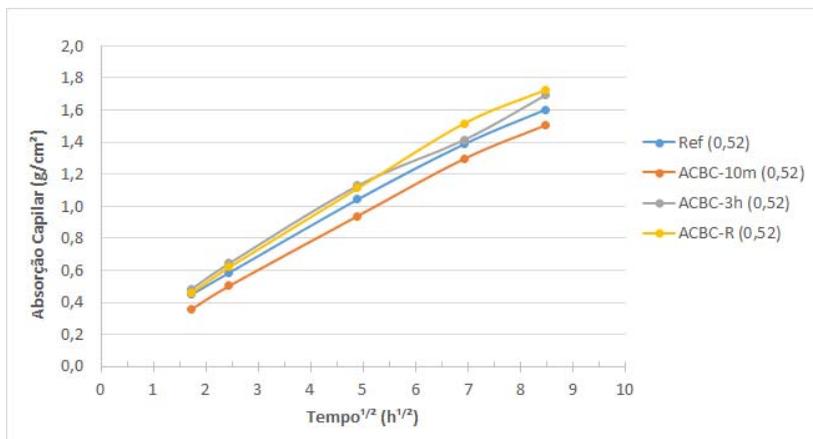


Figura 4.41 – Absorção de água por capilaridade para as argamassas com $a/c = 0,52$

Os resultados de absorção por capilaridade mostram que as argamassas com ACBC-R e a ACBC-3h são as que apresentam os maiores valores de absorção de água por capilaridade. Este resultado pode ser atribuído à presença de fibras do bagaço que não sofreram combustão completa, afetando as a porosidade das misturas de argamassas. As argamassas com ACBC apresentaram maior absorção capilar em relação às argamassas de referência, com exceção para a relação a/c de 0,44 e 0,52 que, a argamassa com ACBC-10m apresentou menor absorção que a referência, provavelmente pelo melhor efeito de empacotamento proporcionado por esta cinza residual. Para a/c de 0,52, os resultados de absorção capilar entre as diferentes misturas foram mais próximos, com as menores diferenças detectadas. No geral, como esperado, quanto maior a relação a/c , maiores foram os valores de absorção capilar obtidos.

Apesar dos índices de vazios mais elevados, as resistências à compressão não foram afetadas, já que, conforme mostrado, as argamassas com cinzas residuais alcançaram maiores valores nas diferentes idades, em relação às misturas de referência.

As Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam os resultados dos ensaios de índice de vazios, massa específica, absorção por imersão total em água e absorção de água por capilaridade após 72 horas, com seus respectivos desvios padrão, para as diferentes argamassas com relação a/c de 0,44, 0,48 e 0,52, respectivamente.

Tabela 4.12 – Valores médios de índices de vazios, massa específica, absorção de água total e absorção por capilaridade das argamassas com $a/c = 0,44$ e seus respectivos desvios padrão (DV).

Característica	Ref		ACBC-10m		ACBC-3h		ACBC-R	
	Média	DV	Média	DV	Média	DV	Média	DV
Índice de Vazios (%)	16,58	0,43	15,92	0,46	15,85	0,32	17,43	0,29
Massa Específica (g/cm^3)	2,667	0,02	2,656	0,02	2,675	0,01	2,680	0,01
Absorção Total (%)	7,45	0,18	7,13	0,22	7,04	0,15	7,88	0,16
Absorção Capilar após 72 h (g/cm^2)	1,34	0,19	1,14	0,19	1,22	0,13	1,51	0,20

Com os resultados das argamassas de relação a/c de 0,44, através da análise de variância pelo teste de Duncan, pode-se afirmar com 95% de confiança que, para os índices de vazios determinados, somente as argamassas com ACBC-10m e ACBC-3h não possuem diferenças significativas entre elas. Os índices de vazios para as argamassas com areias de cinzas moídas foram menores em relação aos da argamassa de referência, provavelmente pelo melhor empacotamento das partículas proporcionado às misturas. Já as argamassas com ACBC-R apresentaram os maiores índices de vazios, que não condiz com os resultados de resistência à compressão, que conforme apresentado, foram maiores em relação às outras misturas. A requeima proporcionou partículas mais porosas, conforme mostrado com MEV, o que pode ter propiciado maior índice de vazios, enquanto que a menor concentração de material carbonoso proporcionou provável efeito pozolânico, conferindo maior resistência à compressão para a argamassa com areias de cinzas requeimadas.

A análise feita para os dados de absorção por imersão total em água apontou o mesmo resultado apresentado para o índice de vazios, ou seja, a absorção por imersão total de água somente não tem diferença significativa entre as argamassas com ACBC-10m e ACBC-3h. Com análise de variância pelo teste de Duncan pode-se afirmar também que, para os resultados de massa específica, não há diferença significativa entre todas as argamassas com $a/c=0,44$ estudadas e, quanto a absorção de água por capilaridade após 72 horas, somente as argamassas com ACBC-10m e ACBC-R possuem diferenças significativas entre si. Para os resultados de desempenho das argamassas com ACBC, ao comparar com os resultados de absorção por capilaridade após 72 horas da argamassa de referência, estatisticamente não se pode afirmar que tenham diferenças significativas.

Tabela 4.13 – Valores médios de índices de vazios, massa específica, absorção de água total e absorção por capilaridade das argamassas com $a/c = 0,48$ e seus respectivos desvios padrão (DV).

Característica	Ref		ACBC-10m		ACBC-3h		ACBC-R	
	Média	DV	Média	DV	Média	DV	Média	DV
Índice de Vazios (%)	17,65	0,57	18,29	0,46	18,24	0,58	18,22	0,71
Massa Específica (g/cm^3)	2,656	0,01	2,652	0,02	2,676	0,02	2,664	0,03
Absorção Total (%)	8,07	0,29	8,44	0,23	8,34	0,31	8,37	0,40
Absorção Capilar após 72 h (g/cm^2)	1,06	0,21	1,36	0,21	1,55	0,22	1,38	0,36

Tabela 4.14 – Valores médios de índices de vazios, massa específica, absorção de água total e absorção por capilaridade das argamassas com $a/c = 0,52$ e seus respectivos desvios padrão (DV).

Característica	Ref		ACBC-10m		ACBC-3h		ACBC-R	
	Média	DV	Média	DV	Média	DV	Média	DV
Índice de Vazios (%)	18,96	0,96	19,45	0,91	18,77	0,62	19,59	0,44
Massa Específica (g/cm^3)	2,658	0,02	2,663	0,06	2,662	0,03	2,677	0,02
Absorção Total (%)	8,80	0,52	9,07	0,38	8,68	0,28	9,10	0,24
Absorção Capilar após 72 h (g/cm^2)	1,58	0,25	1,47	0,35	1,67	0,18	1,70	0,22

Quanto aos resultados apresentados nas Tabelas 4.13 ($a/c = 0,48$) e 4.14 ($a/c = 0,52$), de acordo com análise de variância pelo teste de Duncan, com 95% de confiança, para todas as características não há diferenças significativas entre as misturas de argamassas ensaiadas, mesmo para as argamassas com $a/c=0,48$ que apresentaram índice de vazios, absorção total e absorção capilar após 72 horas, maiores para as misturas com ACBC.

Ao comparar os resultados de absorção de água por capilaridade após 72 horas com os resultados de índice de vazios, para as argamassas com relação a/c de 0,44, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.12, constata-se uma correlação linear com coeficiente R^2 de 0,71, conforme apresenta a Figura 4.42. Esta correlação indica que a absorção de água por capilaridade aumenta de acordo com o aumento do índice de vazios na argamassa, sendo um resultado esperado e conhecido. A mesma correlação para as argamassas com relação a/c de 0,48 e 0,52 (Tabelas 4.13 e 4.14) resultaram em coeficientes R^2 muito baixos, de 0,48 e 0,11, respectivamente, indicando que quanto maior a relação a/c , menores as correlações existentes entre estas características da argamassa, provavelmente pela perda da reatividade da ACBC com o aumento de água na mistura.

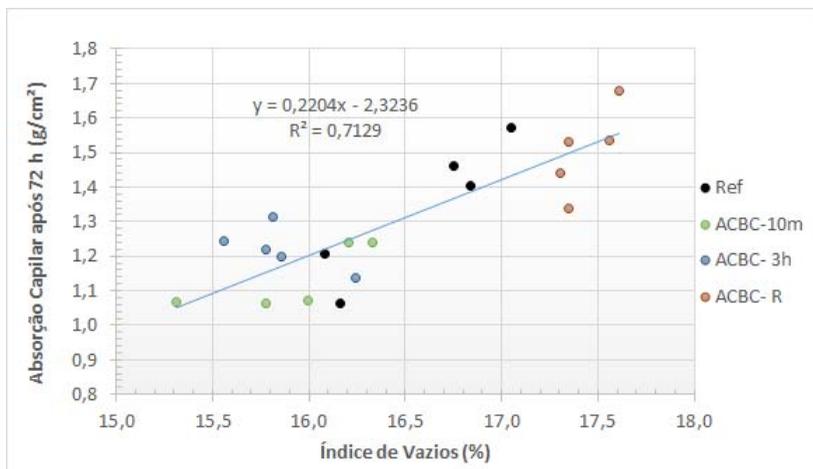


Figura 4.42 – Correlação linear entre absorção de água por capilaridade e índice de vazios para argamassas com $a/c = 0,44$

4.3.8. Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV)

Ensaio de microscopia de varredura eletrônica (MEV) realizados nas argamassas com ACBC e diferentes relações a/c , mostram a microestrutura das mesmas, com aumento de até 5.000 vezes, nas idades de 28 e 60 dias. Nestas idades são identificados cristais aciculares de etringita e C-S-H. Para a idade de 28 dias, observa-se maior porosidade e formação de estrutura mais densa de C-S-H e cristais de etringita. Aos 60 dias, tornam-se estruturas mais compactas, decorrente do desenvolvimento do C-S-H. No geral, pelos resultados apresentados, a sílica (fase amorfa) presente nas argamassas, provavelmente foi consumida, contribuindo para a formação do C-S-H até aos 60 dias, indicando um provável efeito pozolânico presente nas misturas com a presença da ACBC.

Para exemplificar, são apresentados alguns resultados de MEV, sendo a figura 4.43 proveniente da análise da argamassa ACBC-R (0,44), a figura 4.44 para a argamassa ACBC-R (0,48) e a figura 4.45 para a argamassa ACBC-3h (0,52).

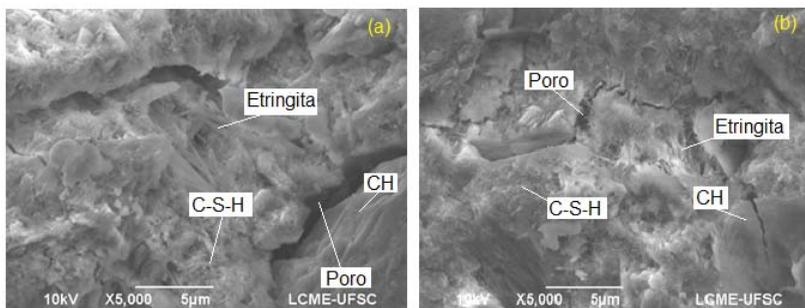


Figura 4.43 – Aspecto da argamassa com ACBC-R (0,44) nas idades de (a) 28 dias e (b) 60 dias

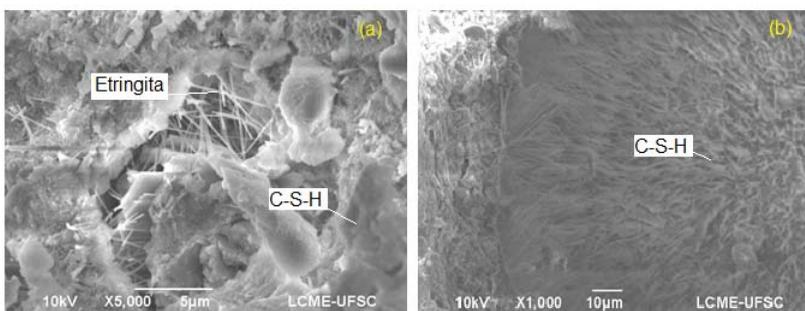


Figura 4.44 – Aspecto da argamassa com ACBC-R (0,48) nas idades de (a) 28 dias e (b) 60 dias

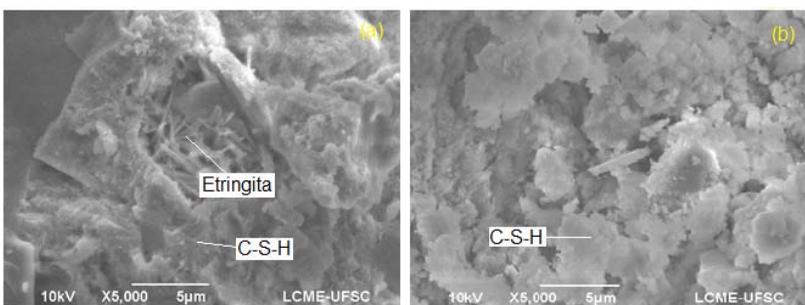


Figura 4.45 – Aspecto da argamassa com ACBC-3h (0,52) nas idades de (a) 28 dias e (b) 60 dias

As morfologias de C-S-H são variáveis, nas cinzas ACBC-R, embora tenha havido a requieima, como mostra a Figura 4.43(b),

percebe-se o crescimento de produtos de hidratação dentro do poro do material incombusto.

Na argamassa ACBC-R (0,48), na idade de 60 dias, a imagem revela o produto interno de hidratação, com forma de C-S-H tipo IV, onde uma partícula de cimento recoberta é consumida com o avanço da hidratação. As morfologias encontradas nas argamassas foram semelhantes a ninho de abelhas e fibras (C-S-H do tipo I e II), pois o material é complexo e polimorfo (TAYLOR, 1990). Cristais de portlandita também foram identificados como placas finas.

4.4. Discussão dos Resultados

Os resultados apresentados indicam que a ACBC utilizada neste estudo, com seus diferentes tratamentos, age nas misturas preenchendo os vazios entre as partículas, além de possuir efeito pozolânico, estando em concordância com o postulado por Souza (2011). A utilização de areias de cinzas em misturas cimentícias apresenta um efeito físico de compactidade devido a influência no empacotamento da mistura por serem muito finas, preenchendo os vazios entre as partículas de cimento, assim como, um efeito pozolânico, associado aos compostos silicosos e/ou aluminosos amorfos fornecidos pelas areias de cinzas, que na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio.

As características físicas do concreto são importantes para a integridade estrutural no decorrer de sua vida útil e a interação entre sua camada superficial com o ambiente externo é um fator preponderante para isso. Processos de degradação, como carbonatação e ingresso de cloretos e sulfatos, estão associados a fenômenos físico-químicos que ocorrem no concreto na presença de água. Sendo assim, a avaliação da absorção de água e índice de vazios ocasionados pela adição de areias de cinzas fez-se necessária, e os resultados apontam que, estatisticamente, não há diferenças significativas entre as argamassas de referência e as argamassas com ACBC, com exceção do índice de vazios para as misturas com a/c de 0,44, pois a ACBC-R apresentou maiores valores em relação à referência, enquanto que a ACBC-10m e ACBC-3h apresentaram valores menores em relação à referência.

Quanto aos diferentes tratamentos aqui estudados para a ACBC, a requeima, embora demandando maior energia para sua produção, justifica-se, tendo em vista que benefícios proporcionados estão associados ao efeito acelerador e maior resistência.

Ao comparar o desempenho das areias de cinzas moídas, a ACBC-3h, que demanda um maior consumo de energia elétrica e de tempo para sua produção a partir da cinza residual coletada na usina,

não se justifica, já que seu comportamento em misturas de argamassa no estado fresco foi similar àquelas com areias de cinzas com moagem por 10 minutos e, portanto, um consumo bem menor de energia.

Os resultados positivos alcançados neste estudo com o uso das areias de cinzas são devidos ao efeito físico de preenchimento e/ou a atividade pozolânica das cinzas utilizadas, conforme resultados de caracterização físico-química apresentados.

A incorporação destes resíduos substituindo parte dos agregados miúdos em misturas de concretos e argamassas, que são materiais amplamente utilizados nas construções, independentemente do tipo de tratamento, podem trazer alguns benefícios além dos já citados, dentre eles, uma produção sustentável voltada à preservação ambiental, valorização dos resíduos, aumento da qualidade dos produtos e possibilidade de viabilidade econômica de produção.

A utilização da técnica de ultrassom forneceu dados necessários e suficientes para a análise das características da pega em misturas de argamassas e concretos frescos. Os resultados de aceleração da pega obtidos com este método, através das leituras de velocidades dos pulsos ultrassônicos, são comparados aos resultados obtidos com o método do penetrômetro, mostrando ser eficaz na obtenção de dados tanto quanto ao método já estabelecido e normatizado.

A vantagem da utilização da técnica de ultrassom está na facilidade de obtenção dos dados, pois possibilita a automatização das leituras, sem demandar nenhum procedimento especial de preparação das misturas. As leituras podem ser programadas por determinado tempo, conforme necessidade, permitindo a visualização do comportamento do material analisado ao longo deste intervalo, o que pode correlacionar, simultaneamente, com leituras de outras características, como a temperatura. Ainda, os dados obtidos podem ser exportados em planilhas para as análises necessárias.

Com o penetrômetro, as leituras devem ser executadas em argamassas do concreto ensaiado, tendo a necessidade inicial de peneiramento, no caso de concretos, para retirada das britas, pois estas influenciam nas leituras de penetração. Ainda, o processo todo não é automatizado, tendo a necessidade de anotar os valores de leituras para posterior lançamento em planilhas para as devidas análises.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, cinzas de areia do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) com diferentes tratamentos foram utilizadas em misturas de concretos e argamassas em substituição parcial dos agregados miúdos. Os efeitos na pega destas misturas, no estado fresco, com diferentes relações água/cimento (a/c), para as argamassas, e diferentes porcentagens de substituições, para concretos, foram monitorados através de leituras de resistência à penetração e velocidades dos pulsos ultrassônicos.

Para as diferentes temperaturas das misturas durante a pega, foram determinadas as idades equivalentes (t_e) através de funções de maturidade, com a finalidade de equalizar os resultados para posterior análise.

Os processos de moagem das cinzas residuais tornaram as dimensões de suas partículas próximas à parcela de finos das areias utilizadas na confecção das argamassas e concretos. A ACBC-10m apresentou diâmetro médio de 60 μm e a CBC-3h diâmetro médio de 40 μm , sendo que 10% destas cinzas residuais apresentaram partículas inferiores à 15 μm e 6 μm , respectivamente. Parcelas finas proporcionaram o efeito de preenchimento nas misturas, conferindo maior compacidade às misturas, levando a maior resistência à compressão.

Quanto ao índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, as cinzas utilizadas apresentam potencial para serem pozolânicas, pois apresentaram índices de 89,4%, 87,5% e 102,3%, para ACBC-10m, ACBC-3h e ACBC-R, respectivamente.

A estrutura celular característica das cinzas residuais é composta por elementos fibrilares e muito porosos, o que justifica maior demanda de água e menores índices de consistência para as misturas com ACBC.

Em estudo com pastas de hidróxido de cálcio, o aumento de resistência à compressão, ocorrido nas pastas com ACBC a partir dos 28 dias, indica um efeito pozolânico proporcionado pela cinza residual, devido as reações com o hidróxido de cálcio continuarem ocorrendo em idades avançadas.

Na idade de 28 dias, conforme resultados obtidos com o difratograma de raios X em amostras de pastas, a fase de quartzo referente a SiO_2 é reduzida nas pastas com ACBC, praticamente desaparecendo nas pastas com ACBC-R, demonstrando o efeito

pozolânico e formação do C-A-H. As reações acontecem entre a fase amorfa da cinza e os íons Ca do hidróxido de cálcio hidratado.

As argamassas com ACBC apresentaram menores índices de consistência em relação às argamassas de referência, proporcionados pela menor granulometria das partículas de cinza residuais em relação aos finos presentes nos agregados miúdos.

Leituras de resistência à penetração nas argamassas no estado fresco indicam que as areias de cinzas aceleram a pega. Da mesma forma, os resultados de velocidade dos pulsos ultrassônicos indicam que as misturas com ACBC aceleraram a pega, em relação às misturas de referência. De modo geral, as argamassas com ACBC-R foram as que resultaram em maior aceleração no processo de hidratação, devido a melhor reatividade proporcionada à esta areia de cinza pelo tratamento adotado.

Para resistência à compressão, a ACBC-R destaca-se, com maiores valores comparados as outras misturas com ACBC e referência. Para uma relação a/c de 0,44, a argamassa com cinza requeimada chegou a atingir resistência à compressão 20% superior ao valor obtido para a argamassa de referência, aos 28 dias. Os valores maiores de resistência à compressão indicam a ocorrência de efeito pozolânico e o efeito de preenchimento proporcionados pelas areias de cinzas.

Estatisticamente, as argamassas com areias de cinzas não possuem diferenças significativas em comparação às argamassas de referência, para índices de vazios, absorção por imersão total em água, massa específica e absorção de água por capilaridade, indicando que tais características das misturas com ACBC não se diferenciam das argamassas sem areias de cinzas.

A sílica presente nas misturas está sendo consumida e formando o C-S-H, indicando a presença do efeito pozolânico nas misturas com ACBC.

Os concretos com adição de ACBC apresentaram maior relação a/c, para manutenção da trabalhabilidade, em relação às misturas de referência, indicando que há influência da menor granulometria das partículas de cinza em relação aos finos presentes nos agregados miúdos.

Substituição de 5%, 10% e 20% dos agregados miúdos por ACBC, nas misturas de concreto, resultou também em maior aceleração do processo de hidratação do cimento nas primeiras idades, mas devido ao aumento da relação a/c para assegurar a trabalhabilidade das misturas nas idades iniciais, aos 28 dias as resistências à compressão foram menores para as misturas com ACBC.

No geral, com os resultados apresentados, a ACBC-R apesar de demandar maior energia de produção, tem sua aplicação justificada, pois proporciona o efeito acelerador no processo de hidratação e maior resistência à compressão ao longo do tempo, sendo viável para obras específicas, onde a necessidade de aceleração da hidratação é crucial, assim como uma maior resistência à compressão aos 28 dias.

A ACBC-3h não se justifica, já que seu comportamento foi semelhante ao comportamento da ACBC-10m nas misturas de argamassas, demandando maior energia que a ACBC-10m para sua produção.

Já a ACBC-10m é indicada para ser utilizada em obras, pois apresentou melhores resultados em comparação às misturas de referência e o seu processo de tratamento é simples, demandando pouca energia e tempo de preparo. O inconveniente da ACBC-10m é sua trabalhabilidade, por possuir material carbonoso mais grosseiro.

A utilização do método de ultrassom forneceu dados necessários e suficientes para a análise das características das misturas de argamassas e concretos nas primeiras idades. Os resultados de aceleração da pega obtidos com este método, através das leituras de velocidades dos pulsos ultrassônicos, são comparados aos resultados obtidos com o método do penetrômetro, mostrando ser eficaz na obtenção de dados tanto quanto o método já estabelecido e normatizado.

Com os resultados alcançados neste trabalho, conclui-se que a incorporação de areias de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, conforme tratadas neste estudo, é viável em misturas de materiais cimentícios, podendo trazer como benefício uma produção sustentável voltada à preservação ambiental, evitando o descarte deste resíduo na natureza. Ainda, que é viável a utilização da técnica de ultrassom para monitoramento da pega em misturas cimentícias, por ser automatizado, de fácil operação e capaz de fornecer dados confiáveis para caracterização de adições.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, são deixadas algumas sugestões para continuidade deste trabalho:

- Avaliar a viabilidade econômica de concretos produzidos com cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, por meio do levantamento de custos de produção de concretos convencionais;
- Avaliar o potencial de lixiviação de materiais contaminantes em argamassas produzidas com cinzas do bagaço da cana-de-açúcar;
- Quantificar o impacto ambiental regional, da extração de agregados miúdos, devido a possível substituição parcial destes por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de concretos;
- Analisar o potencial de corrosão em armaduras de aço em concretos produzidos com adição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar;
- Moer a cinza do bagaço da cana-de-açúcar após o processo de requeima e fazer sua caracterização físico-química, para estudar sua utilização em misturas de argamassas e/ou concretos como adição em substituição parcial dos agregados miúdos.

7. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR NM 76 - Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro - RJ, 1998a.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
ABNT NBR NM 23 - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro - RJ, 2001.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
ABNT NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro - RJ, 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro - RJ, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro - RJ, 2012a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR NM 18 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogoRio de Janeiro - RJ, 2012b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
ABNT NBR 9779 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro - RJ, 2012c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica - NBR 8802. Rio de Janeiro - RJ, 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Aglomerantes de Origem Mineral - NBR 11172. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Cimento Portland Pozolânico - NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Resíduos sólidos – Classificação - NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Materiais pozolânicos — Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland — Índice de atividade pozolânica com cimento — Método de ensaio - NBR 5752. Rio de Janeiro, 2012a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica — Índice de atividade pozolânica com cal — Método de ensaio - NBR 5751. Rio de Janeiro, 2012b.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
Materiais Pozolânicos - Determinação do Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias - NBR 5752. Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2014.

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

ACI COMMITTEE 228. **In-Place Methods to Estimate Concrete Strength.** Farmington Hills American Concrete Institute, 2003.

AGASSI, J. D. et al. Concretos produzidos com substituição parcial do agregado miúdo por cinza de bagaço de cana-de-açúcar: avaliação da resistência à compressão e da carbonatação acelerada. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 10, 2012.

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

ALMEIDA, F. DO C. R. **Avaliação do Potencial de Corrosão de Armaduras em Concretos com Substituição Parcial do Agregado Miúdo pela Areia de Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar - ACBC.** Dissertação de Mestrado. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and Concrete Terminology Reported. ACI 116R-00**, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance - ASTM C403/C403M – 08, 2008. Disponível em:
<[ftp://ftp.astmtmc.cmu.edu/docs/diesel/cummins/procedure_and_ils/ism/Archive/ISM Procedure \(Draft 10\).doc](ftp://ftp.astmtmc.cmu.edu/docs/diesel/cummins/procedure_and_ils/ism/Archive/ISM Procedure (Draft 10).doc)>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method - ASTM C 1074, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. ASTM C 618-12a, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement - ASTM C 230. **ASTM**, p. 6, 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete - ASTM C597**, 2009.

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2000.

BESSA, S. A. L. **Utilização da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar como Agregado Miúdo em Concretos para Artefatos de Infraestrutura Urbana**. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2011.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAN, M. G. **Testing of Concrete in Structures**. 4. ed. Londres: Taylor & Francis, 2006.

CÂMARA, E. et al. Uso da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar Na Mistura de Concretos. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto - Maceió-AL**, p. 1–8, 2012.

CHEN, W.; SHUI, Z.; LI, Y. Early age hydration of cement paste monitored with ultrasonic velocity and numerical simulation. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 25, n. 4, p. 704–707, 19 ago. 2010.

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

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e Pozzolânicas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 381–413.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar, Safra 2013/2014, Terceiro Levantamento, Dezembro/2013**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_12_20_10_56_08_boletim_cana_portugues_-_dez_2013_3o_lev_-_original.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2014.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 313 - Inventário Nacional de Resíduos Sólidos, 2002**.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Mineraiis em Concreto**. Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C. et al. Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 641–646, abr. 2012.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. DE M. R. Caracterização de Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar par aEmprego com oPozolana em Materiais Cimentícios. **Quimica Nova**, v. 32, n. 1, p. 82–86, 2009a.

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

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine sugar cane bagasse ash : high potential pozzolanic material for tropical countries. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 1, p. 50– 67, 2010.

CORTEZ, L.; MAGALHAES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canvieira e sua valorização. **Sociedade Brasileira de Planejamento Energético**, v. 2, p. 1–17, 1992.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). . **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 261–310.

DAL MOLIN FILHO, R. G. **Concreto Autoadensável com Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, 2013.

DE PAULA, M. O. et al. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 031, p. 353–357, 2009.

DONGYU, X. et al. Monitoring of cement hydration reaction process based on ultrasonic technique of piezoelectric composite transducer. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 220–226, out. 2012.

FAIRBAIRN, E. M. R. et al. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 9, p. 1864–71, set. 2010.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa**. São Paulo - SP, 2001.

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

GHORBEL, H.; SAMET, B. Effect of iron on pozzolanic activity of kaolin. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 185–191, 2013.

GROSSE, C. U.; REINHARDT, H.-W. Fresh Concrete Monitored by Ultrassoud Methods. **Otto-Graf-Journal**, v. 12, p. 157–168, 2001.

HERNÁNDEZ, J. F. M. et al. Use of the Wastes of the Sugar Industry as Pozzolana in Line-Pozzolana Binders: Study of the Reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p. 1525–1536, 1998.

IRRIGARAY, M. A. P. **Estimativa da Resistência do Concreto à Compressão por Meio da Velocidade de Pulsos Ultrassônicos na Pasta do Concreto**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

LIU, S. et al. Monitoring setting and hardening process of mortar and concrete using ultrasonic shear waves. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 248–255, 2014.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, dez. 2011.

MACEDO, P. C. et al. Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil. **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 1–14, 2009.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2009.

MALHOTRA, V. M. Introduction : Sustainable Development and Concrete. **Concrete International**, v. 24, n. 7, p. 22, 2002.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. CRC Press, 2004. v. 992

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. 1ª. ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARTINS, C. H.; ZANELLA, R. M. Avaliação da absorção por capilaridade em argamassas produzidas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 1–14, 2009.

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. London: Arnold Publishers, 1998. p. 471–635.

MEHTA, P. K. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. **Concrete International**, v. 24, n. 7, p. 23–28, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: PINI, 2008.

MENEGHETTI, L. C. **Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos nas Primeiras Idades Através de Ultra-som**. Dissertação de Mestrado. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

MIKULIC, D., SEKULIC, D.; STIRMER, N.; BJEGOVIC, D.. Application of Ultrasonic of Methods for Early Age Concrete Characterisation. **The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing**, p. 99 - 108, September, 2005

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/E99F974D/Doc_PNR_S_consultaspublicas1.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2014.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

P. LAWRENCE; M. CYR; E. RINGOT. Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1939 – 1947, 2003.

PAYÁ, J. et al. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 77, n. 3, p. 321–325, mar. 2002.

PINTO, R. C. A.; SCHINDLER, A. K. Unified modeling of setting and strength development. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 1, p. 58–65, 2010.

PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J.; GARGHETTI, A.; HADLICH, A. R.; BERTACCO, L. L.; KUMM, V. P.; PFLEGER, V. Controle de Qualidade do Concreto em Obra Utilizando Técnicas Não-destrutivas. **46º IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto**, 2004.

RÊGO, J. H. DA S.; CAVALCANTI, A. A.; PEREIRA, C. H. A. F. Influência da substituição do agregado miúdo por Cinza do Bagaço de Cana na resistência à compressão e absorção de água de concretos. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 16, 2012.

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

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 30, n. 6, p. 1114–22, jun. 2010.

SALOMÃO, R.; AMARAL, L. F.; PANDOLFELLI, V. C. Adição de cimento de aluminato de cálcio e seus efeitos na hidratação do óxido de magnésio. **Cerâmica**, v. 56, p. 135–140, 2010.

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do Comportamento Mecânico de Concretos Produzidos com incorporação de Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar de Variedades SP911049, RB92579 E SP816949**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

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**. New Jersey: Noyes Publications, 2001. p. 231 –274.

SHE, W. et al. In-situ monitoring the setting behavior of foamed concrete using ultrasonic pulse velocity method. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 28, n. 6, p. 1146–1154, 2013.

SILVA, E. F. et al. Técnica da propagação de pulso ultrassônico para determinação do tempo-zero (t_0) em concretos de alto desempenho (CAD). **6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**, 2011.

SILVA, E. F. et al. TÉCNICA DO ULTRASSOM PARA DETERMINAR O TEMPO-ZERO DE MICROCONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto**, n. 1, p. 1–16, 2013.

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

SOUTO, J. M. F. **Avaliação do Desempenho da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar na Produção de Concretos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, 2010.

SOUZA, L. M. S. DE. **Estudo de Hidratação e Nanoindentação de Pastas de Cinza da Casca de Arroz e Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar com Hidróxido de Cálcio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; SALEM, A. A. Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 218–223, maio 2012.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TRTNIK, G.; GAMS, M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages. **Ultrasonics**, v. 54, n. 1, p. 66–75, 2014.

UNICA. UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Indústria Brasileira de Cana-de-açúcar: Uma trajetória de Evolução**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 7 jan. 2014a.

UNICA. UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Produção de Cana-de-Açúcar**.

UNICA. UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **FAQ**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 7 jan. 2014c.

UNICA. UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Documentos**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/documentos.php>>. Acesso em: 7 jan. 2014d.

UNICA. UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR.
Mapa de Produção. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>>. Acesso em: 7 jan. 2014e.

VICENTE, G. R.; PRISZKULNIK, S.; KUPERMAN, S. C. Uso de ultrassom para Determinação do Tempo de Início de Pega do Cimento em Argamassas e Concretos. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**, n. 1, p. 15, 2010.

WELLENKAMP, F.-J. **Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão.** 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999.

YE, G. et al. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 491–497, jul. 2004.

ZHANG, T. et al. Effects of size fraction on composition and fundamental properties of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 7, p. 3038–3043, jul. 2011.

ANEXO 1
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO CIMENTO CP V ARI

TIPO : **CP V-ARI****RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO**

PERÍODO : mai/15

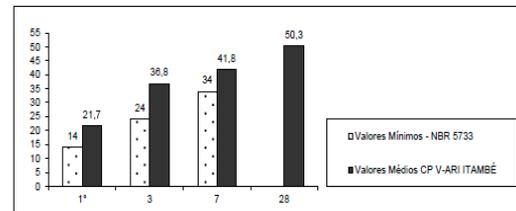
EMISSÃO : 30/06/2015

Data	Químicos										Físicos												
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega			Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão				
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	h : min	h : min	h : min	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
04	4,45	19,25	2,68	60,86	4,22	2,53	3,10	0,87	0,65	0,66	0,00	03:15	04:00	28,6	4,010	0,10	1,40	21,0	35,9	41,3	50,1		
06	4,51	19,08	2,71	60,74	4,86	2,58	3,06	0,81	0,63	0,66	0,00	03:00	03:30	27,7	3,940	0,04	1,70	20,8	35,2	41,1	51,4		
08	4,50	19,02	2,71	60,90	4,51	2,58	3,02	1,04	0,84	0,66	0,00	03:15	04:00	27,8	3,900	0,10	2,00	20,7	37,0	40,7	50,0		
12	4,51	19,12	2,73	61,65	4,01	2,65	3,03	1,04	0,66	0,66	0,00	03:15	04:00	28,1	3,910	0,10	1,70	21,0	37,1	42,0	50,1		
14	4,52	19,03	2,70	61,74	3,52	2,65	3,11	1,21	0,66	0,70	0,50	03:30	04:00	28,5	3,880	0,20	2,40	22,7	37,1	42,4	50,9		
20	4,64	19,02	2,71	60,97	4,45	2,69	3,05	1,12	0,78	0,73	0,50	03:10	03:45	28,5	3,980	0,06	2,10	23,4	38,4	42,5	50,0		
22	4,54	18,92	2,77	60,89	4,71	2,66	2,96	0,93	0,78	0,71	0,00	03:20	04:00	28,7	3,930	0,10	1,80	22,4	36,4	42,2	50,1		
26	4,56	19,04	2,85	60,53	5,42	2,57	2,95	0,76	0,64	0,71	0,00	03:15	03:45	28,6	3,970	0,20	1,70	21,9	37,3	42,7	50,4		
28	4,50	18,76	2,72	60,93	4,95	2,68	3,01	0,79	0,72	0,72	0,00	03:25	04:00	28,6	3,880	0,09	1,90	21,0	36,6	41,7	49,8		
Média	4,53	19,03	2,73	61,02	4,52	2,62	3,03	0,95	0,71	0,69	0,11	03:16	03:53	28,3	3,933	0,11	1,86	21,7	36,8	41,8	50,3		
Sd	0,05	0,13	0,05	0,40	0,56	0,06	0,06	0,16	0,08	0,03	0,22	00:09	00:11	0,4	45,83	0,06	0,29	1,0	0,9	0,7	0,5		
Min	4,45	18,76	2,68	60,53	3,52	2,53	2,95	0,76	0,63	0,66	0,00	03:00	03:30	27,7	3,880	0,04	1,40	20,7	35,2	40,7	49,8		
Max	4,64	19,25	2,85	61,74	5,42	2,69	3,11	1,21	0,84	0,73	0,50	03:30	04:00	28,7	4,010	0,20	2,40	23,4	38,4	42,7	51,4		

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 5733, a qual não estabelece valor mínimo.

A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3,09 g/cm³ (NBR NM 23).

As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.



ANEXO 2
PROTÓTIPO PARA LEITURAS COM ULTRASSOM
Adaptado de IRRIGARAY (2012)

Primeira etapa da montagem do dispositivo, base prismática:

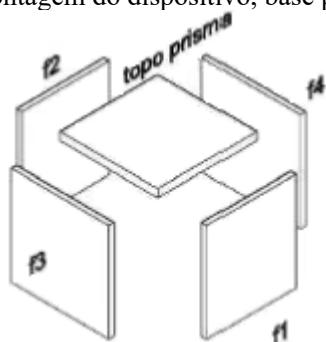


Figura A1 - Partes que compõem a base prismática, feitas de madeiras compensadas de 10 mm

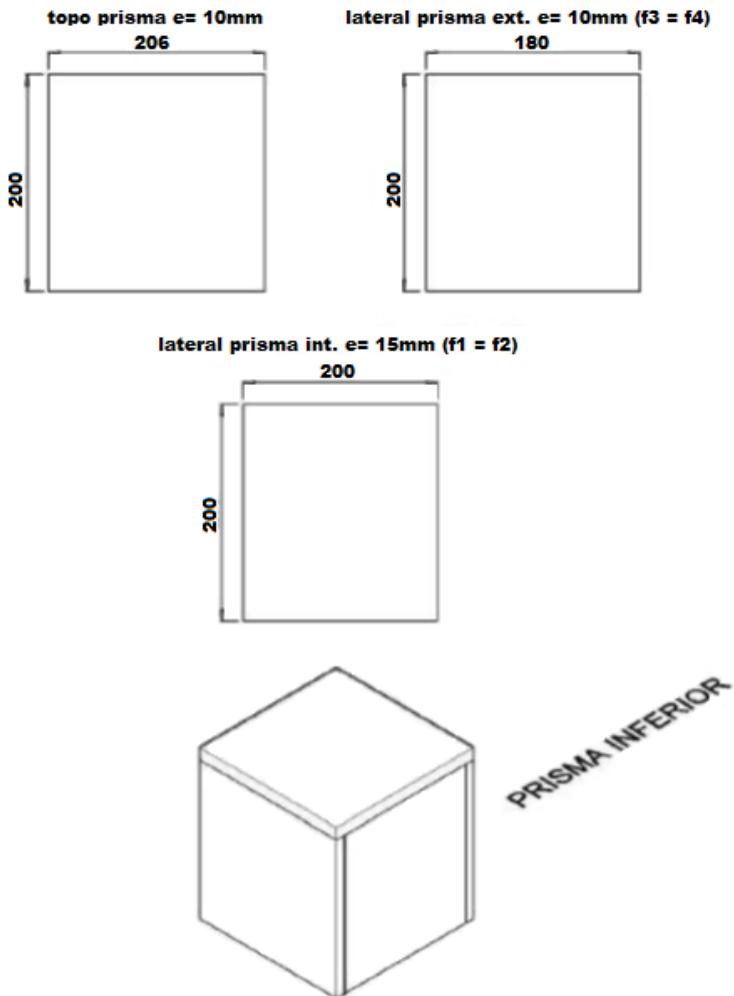


Figura A2 - Dimensões dos elementos da base prismática

Segunda etapa da montagem do prisma:

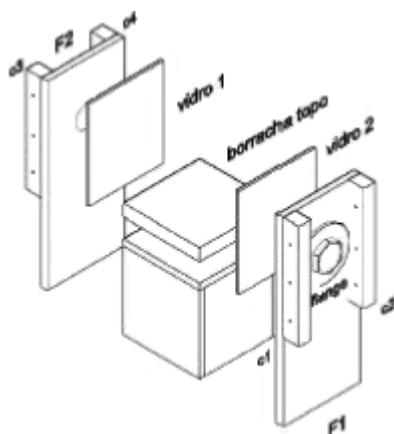


Figura A3 - Segunda etapa da montagem do dispositivo

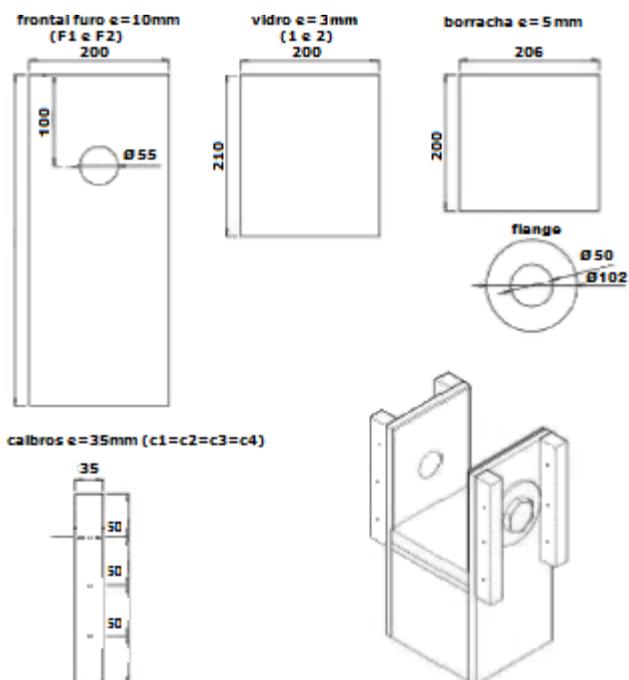


Figura A4 - Detalhe das fases laterais afixadas a base prismática.

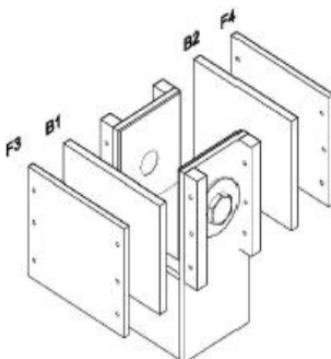


Figura A5 - Terceira etapa da montagem do dispositivo



Figura A6 - Partes da terceira etapa

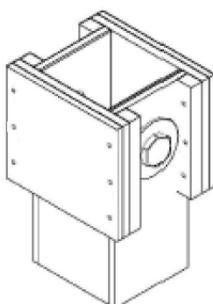


Figura A7 - Dispositivo para leitura da velocidade de pulsos ultrassônicos em pastas, argamassas e concretos no estado fresco

ANEXO 3
ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Resistência à Compressão

Teste de Hipóteses pelo Método Fatorial

Idade	Mistura (0,44)															
	Ref				CBC - 10m				CBC - 3h				CBC - R			
	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²
3	33,5				39,9				46,6				31,8			
	42,5				44,0				38,1				34,3			
	38,0	224,52	50409,23	8452,69	41,4	240,24	57715,26	9650,42	37,9	235,35	55389,62	9313,27	29,8	199,50	39800,25	6654,35
	37,6				37,8				34,3				34,0			
	35,1				37,1				39,2				34,0			
	37,4				40,0				39,2				35,3			
7	43,3				51,8				39,8				54,5			
	37,0				50,0				48,7				47,6			
	41,6	234,15	54826,22	9189,99	42,7	294,30	86612,49	14491,23	45,9	273,60	74856,96	12525,26	40,7	274,92	75581,01	12726,86
	34,2				51,7				48,0				45,5			
	39,0				49,1				45,6				40,8			
	39,0				49,1				45,6				45,8			
14	49,9				54,7				46,2				48,6			
	42,9				52,9				50,1				52,7			
	46,3	264,48	69949,67	11734,01	60,4	321,84	103580,99	17350,51	51,6	293,70	86259,69	14393,63	46,2	299,76	89856,06	15006,54
	43,1				53,0				47,9				49,7			
	38,2				52,8				49,0				52,6			
	44,1				53,6				49,0				50,0			
28	46,6				51,6				52,3				56,3			
	44,0				51,4				50,7				55,8			
	45,1	270,84	73354,31	12229,19	52,6	312,40	97593,76	16280,00	56,2	322,60	104070,76	17364,68	53,3	324,30	105170,49	17541,61
	45,0				53,0				53,9				53,9			
	45,0				54,4				55,0				52,9			
	45,1				49,4				54,5				52,3			
60	46,3				60,7				63,8				52,9			
	42,2				55,2				60,9				55,6			
	40,1	262,05	68670,20	11474,76	50,9	328,20	107715,24	18010,52	54,7	345,48	119356,43	19995,37	58,3	329,40	108504,36	18103,16
	46,1				52,0				50,9				53,2			
	43,7				54,7				57,6				54,5			
	43,7				54,7				57,6				54,9			
Σ C		1256,0				1497,0				1470,7				1427,9		
DV	0,83				1,70				1,98				1,62			
DV ²	0,69				2,87				3,91				2,64			

Idade	Mistura (0,48)															
	Ref				CBC - 10m				CBC - 3h				CBC - R			
	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ³)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²
3	33,7				31,6				29,8				37,0			
	35,6				31,0				34,8				33,2			
	30,9	208,50	43472,25	7278,43	36,4	199,95	39980,00	6682,12	34,7	208,56	43497,27	7290,76	35,9	213,75	45689,06	7623,29
	38,8				34,3				35,8				36,4			
	34,8				33,3				38,7				35,6			
	34,8				33,3				34,8				35,6			
7	32,2				38,7				39,8				42,5			
	35,6				31,1				43,5				38,2			
	32,5	204,75	41922,56	6999,92	39,0	213,60	45624,96	7651,50	42,3	255,36	65208,73	10899,33	43,5	249,30	62150,49	10374,55
	36,2				33,2				46,8				42,0			
	34,1				36,0				40,4				41,6			
	34,1				35,6				42,6				41,6			
14	36,7				39,3				42,2				47,0			
	37,7				41,3				47,2				48,0			
	43,1	232,80	54195,84	9082,56	44,9	244,08	59575,05	9959,46	44,0	273,84	74988,35	12524,59	45,0	271,05	73468,10	12276,05
	41,8				40,4				46,1				40,7			
	34,7				37,5				48,7				45,2			
	38,8				40,7				45,6				45,2			
28	43,0				47,2				47,5				47,9			
	46,3				47,0				49,6				51,8			
	41,2	262,00	68644,00	11464,96	48,0	280,20	78512,04	13116,98	50,1	290,40	84332,16	14064,50	49,4	292,80	85731,84	14306,10
	42,7				41,6				46,4				46,1			
	42,3				48,0				48,4				48,8			
	46,5				47,7				48,4				48,8			
60	44,7				44,3				50,0				53,9			
	40,6				51,9				46,4				53,9			
	45,3	268,92	72317,97	12081,14	49,8	280,56	78713,91	13186,74	49,8	288,48	83220,71	13883,51	50,1	306,45	93911,60	15690,70
	47,9				46,1				46,1				46,4			
	45,6				46,1				48,1				51,1			
	44,8				46,8				48,1				51,1			
Σ C		1177,0				1218,4				1316,6				1333,4		
DV	2,20				2,52				1,35				1,87			
DV ²	4,86				6,33				1,83				3,49			

Idade	Mistura (0,52)												Total
	Ref			CBC - 10m			CBC - 3h			CBC - R			
	C (g/cm³)	Σ C	(Σ C)²	C (g/cm³)	Σ C	(Σ C)²	C (g/cm³)	Σ C	(Σ C)²	C (g/cm³)	Σ C	(Σ C)²	
3	27,9			30,4			31,1			30,1			
	26,8			37,5			37,1			25,9			
	24,8	162,40	26373,76	30,2			28,6			29,0			
	28,2			36,1	201,30	40521,69	34,6	197,10	38848,41	31,3	174,45	30432,80	5088,22
	25,5			33,6			32,9			29,1			
	29,2			33,6			32,9			29,1			
7	28,2			34,0			38,7			39,4			
	32,8			36,5			34,5			39,2			
	29,2			34,1	204,24	41713,98	38,7	224,10	50220,81	34,1	227,10	51574,41	8614,75
	37,5	191,10	36519,21	33,2			37,5			38,7			2846,5200
	29,5			32,4			37,4			37,9			
	33,9			34,0			37,4			37,9			
14	34,5			41,1			42,9			48,6			
	43,5			44,2			43,6			44,8			
	34,3	218,88	47908,45	33,7	235,80	55601,64	37,9	251,90	63453,61	46,4	277,32	76906,38	12832,22
	35,9			38,2			40,6			47,4			
	34,2			39,3			43,0			43,9			
	36,5			39,3			43,9			46,2			
28	40,7			41,3			43,7			43,7			
	44,9			43,3			50,0			49,2			
	44,1	252,60	63806,76	42,2	258,50	66822,25	42,5	276,20	76286,44	47,9	278,10	77339,61	12967,95
	37,5			47,7			47,2			40,8			
	42,3			40,9			40,5			51,6			
	43,1			43,1			52,3			44,9			
60	41,4			50,0			41,6			51,6			
	38,4			37,6			52,3			45,7			
	43,8	255,96	65515,52	44,0	260,52	67870,67	38,9	271,80	73875,24	51,6	301,92	91155,69	15224,16
	47,7			42,9			45,3			52,9			
	42,0			42,6			48,4			49,8			
	42,7			43,4			45,3			50,3			
Σ C	1080,9			1160,4			1221,1			1258,9			15418,2700
DV	2,68			2,45			4,58			3,95			
DV²	7,20			6,02			20,98			15,60			

Teste de Hipótese pelo Modelo Fatorial (Até 60 dias)

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F _{0,05(V1,V2)}	
Tratamento	17521,06584	59	296,967218	36,80	1,37	Os Tratamentos influenciam na Resistência à Compressão
Resíduo	2420,85883	300	8,069529			
Total	19941,92467	359				

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F _{0,05(V1,V2)}	
A/C	3717,00788	2	1858,50394	230,31	3,03	A relação A/C influencia na Resistência à Compressão
Idade	10214,58875	4	2553,64719	316,46	2,40	A Idade influencia na Resistência à Compressão
CBC	1861,79714	3	620,59905	76,91	2,63	A CBC influencia na Resistência à Compressão
A/C x Idade	145,75008	8	18,21876	2,26	1,97	A A/C x Idade influenciam na Resistência à Compressão
A/C x CBC	490,22899	6	81,70483	10,13	2,13	A A/C x CBC influenciam na Resistência à Compressão
Idade x CBC	496,12492	12	41,343743	5,12	1,78	A Idade x CBC influenciam na Resistência à Compressão
A/C x Idade x CBC	595,56808	24	24,815337	3,08	1,55	A A/C x Idade x CBC influenciam na Resistência à Compressão
Resíduo	2420,85883	300	8,069529			
Total	19941,92467	359				

Comparação Múltipla de Médias

Efeito da cinza na resistência à compressão para 28 dias – a/c = 0,44

Comparação do efeito da cinza na resistência à compressão para 28 dias									
		Resistências à Compressão (MPa)							
		Ref	CBC 10m	CBC 3h	CBC R				
		46,6	51,6	52,3	56,3				
		44	51,4	50,7	55,8				
		45,1	52,6	56,2	53,3				
		45	53	53,9	53,7				
		45	54,4	55	52,9				
		45,1	49,4	54,5	52,3				
n		6	6	6	6	Média Geral			
média grupos		45,133	52,067	53,767	54,050	51,254			
Sj		0,833	1,695	1,978	1,624	Total Geral			
Tj		270,800	312,400	322,600	324,300	1230,100			
n-1		5,000	5,000	5,000	5,000	N total	N-K	20	
Sj^2		0,695	2,875	3,911	2,639	24,000			
(n-1)*Sj^2		3,473	14,373	19,553	13,195	Soma	50,595		
log Sj^2		-0,158	0,459	0,592	0,421				
(n-1)logSj^2		-0,791	2,293	2,961	2,107	Soma	6,570		
1/(n-1)		0,200	0,200	0,200	0,200				
(médiacol-média total)		-6,121	0,813	2,513	2,796				
*(médiacol-média total)^2		224,7876	3,96094	37,87594	46,9001042				

1- Verificação da normalidade dos resíduos em relação as médias das colunas e da existência de valores espúrios											
		Resistências				i	xi	zi	P < xi	i/n	diferença
		Ref	CBC 10m	CBC 3h	CBC R						
		1,467	-0,467	-1,467	2,250	2	-3,067	-2,068	0,019	0,042	0,022
		-1,133	-0,667	-3,067	1,750	3	-2,667	-1,798	0,036	0,083	0,047
		-0,033	0,533	2,433	-0,750	4	-1,750	-1,180	0,119	0,125	0,006
		-0,133	0,933	0,133	-0,350	5	-1,467	-0,989	0,161	0,167	0,005
		-0,133	2,333	1,233	-1,150	6	-1,150	-0,775	0,219	0,208	0,011
		-0,133	2,333	1,233	-1,150	6	-1,133	-0,764	0,212	0,250	0,028
		-0,033	-2,667	0,733	-1,750	7	-0,750	-0,506	0,307	0,292	0,015
						8	-0,667	-0,449	0,327	0,333	0,007
		Verificação da hipótese da igualdade das Variâncias				9	-0,467	-0,315	0,377	0,375	0,002
		Teste de Bartlett				10	-0,350	-0,236	0,407	0,417	0,010
		Para fazer este teste, calcula-se a variância combinada:				11	-0,133	-0,090	0,464	0,458	0,006
						12	-0,133	-0,090	0,464	0,500	0,036
						13	-0,033	-0,022	0,491	0,542	0,051
2,530		$S_c^2 = \sum_{j=1}^k (n_j - 1) \cdot S_j^2 / (N - K)$				14	-0,033	-0,022	0,491	0,583	0,092
						15	0,133	0,090	0,536	0,625	0,089
		e os valores de B e K ₁ dados por:				16	0,533	0,360	0,640	0,667	0,026
						17	0,733	0,494	0,690	0,708	0,019
3,434		$B = 2,3026 \cdot (v \cdot \log S_c^2 - \sum v_j \cdot \log S_j^2)$				18	0,933	0,629	0,735	0,750	0,015
						19	1,233	0,832	0,797	0,792	0,006
						20	1,467	0,989	0,839	0,833	0,005
						21	1,750	1,180	0,881	0,875	0,006
1,750		$K_1 = 1 + \frac{1}{v_i} - \frac{1}{N - K}$				22	2,250	1,517	0,935	0,917	0,019
						23	2,333	1,573	0,942	0,958	0,016
B/K1		1,9621854				24	2,433	1,641	0,950	1,000	0,050
QQ0,05(3)		7,815				média	0,000			Dif max	0,092
Como B/K1 é menor que o valor tabelado, aceita-se a hipótese						Desvio	1,483			Max tab	0,18
da igualdade das variâncias						Valor extremo	-2,068			Aceita-se a Normalidade	
SQG=		313,525				T maximo	2,640				
MQG=		104,508				Portanto não tem espúrio					
MQR=		2,530									
F=		41,312									
F0,05(3,15)		3,098									
Portanto existe diferença entre os tratamentos para 28 dias											

Para comparar as médias, usa-se o Teste de Duncan							
a) Ordenar as médias	1	2	3	4			
	45,133	52,067	53,767	54,050			
b) Calcular o desvio padrão combinado	1,591						
c) Calcular o desvio padrão das médias	$1/nh = \text{soma}(1/nj)/K$			0,167			
	0,649	nh=		6			
d) Utilizando a Tabela XII da apostila							
	rk	2	3	4			
	(n-K)=20	2,95	3,58	3,96			
	RK	1,916	2,325	2,571			
Dif entre 1-2	6,933	1 difere de 2		Dif entre 1-3	8,633	3 é maior do que 1	
Dif entre 2-3	1,700	2 não difere de 3		Dif entre 2-4	1,983	4 não difere de 2	
Dif entre 3-4	0,283	3 não difere de 4		Dif entre 1-4	8,917	4 é maior do que 1	

Efeito da cinza na resistência à compressão para 28 dias – a/c = 0,48

Comparação do efeito da cinza na resistência à compressão para 28 dias							
Resistências à Compressão (MPa)							
	Ref	CBC 10m	CBC 3h	CBC R			
Produção	43,0	47,2	47,5	47,9			
	46,3	47,7	49,6	51,8			
	41,2	48,0	50,1	49,4			
	42,7	47,7	46,4	46,1			
	42,3	48,0	48,4	48,8			
	46,5	47,7	48,4	48,8			
n	6	6	6	6	Média Geral		
média grupos	43,67	47,72	48,40	48,80	47,15		
Sj	2,20	0,29	1,35	1,87	Total Geral		
Tj	262,00	286,32	290,40	292,80	1131,52		
n-1	5,00	5,00	5,00	5,00	N total	N-K	20
Sj^2	4,86	0,09	1,83	3,49	24		
(n-1)*Sj^2	24,29	0,43	9,14	17,46	Soma	51,32	
log Sj^2	0,69	-1,07	0,26	0,54			
(n-1)log Sj^2	3,43	-5,34	1,31	2,72	Soma	2,12	
1/(n-1)	0,2	0,2	0,2	0,2		0,8	
(médiacol-média total)	-3,48	0,57	1,25	1,65			
nj*(médiacol-média total)^2	72,66	1,97	9,43	16,40		100,46	

1- Verificação da normalidade dos resíduos em relação as médias das colunas e da existência de valores espúrios										
	Ref	Resistências			i	xi	zi	P x<xi	i/n	diferença
		CBC 10m	CBC 3h	CBC R						
	-0,667	-0,520	-0,900		1	-2,700	-1,808	0,035	0,042	0,006
	2,633	-0,020	1,200		2	-2,467	-1,651	0,049	0,083	0,034
	-2,467	0,280	1,700		3	-2,000	-1,339	0,090	0,125	0,035
	-0,967	0,000	-2,000		4	-1,367	-0,915	0,180	0,167	0,013
	-1,367	0,280	0,000		5	-0,967	-0,647	0,259	0,208	0,050
	2,833	-0,020	0,000		6	-0,900	-0,603	0,273	0,250	0,023
					7	-0,900	-0,603	0,273	0,292	0,018
					8	-0,667	-0,446	0,328	0,333	0,006
Verificação da hipótese da igualdade das Variâncias										
	Teste de Bartlett				9	-0,520	-0,348	0,364	0,375	0,011
					10	-0,020	-0,013	0,495	0,417	0,078
Para fazer este teste, calcula-se a variância combinada:										
					11	-0,020	-0,013	0,495	0,458	0,036
					12	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
2,566	$S_c^2 = \sum_{i=1}^k (n_j - 1) \cdot S_j^2 / (N - K)$				13	0,000	0,000	0,500	0,542	0,042
					14	0,000	0,000	0,500	0,583	0,083
					15	0,000	0,000	0,500	0,625	0,125
	c os valores de B e K1 dados por:				16	0,000	0,000	0,500	0,667	0,167
					17	0,280	0,187	0,574	0,708	0,134
13,966	$B = 2,3026 \cdot (v \cdot \log S_c^2 - \sum v_j \cdot \log S_j^2)$				18	0,280	0,187	0,574	0,750	0,176
					19	0,600	0,402	0,656	0,792	0,136
					20	1,200	0,803	0,789	0,833	0,044
					21	1,700	1,138	0,872	0,875	0,003
1,75	$K_1 = 1 + \sum \frac{1}{v_j} - \frac{1}{N - K}$				22	2,633	1,763	0,961	0,917	0,044
					23	2,833	1,897	0,971	0,958	0,013
B/K1	7,980				24	3,000	2,008	0,978	1,000	0,022
QQ0,05(3)	7,815				média		0		Dif max	0,176
Como B/K1 é menor que o valor tabelado, aceita-se a hipótese da igualdade das variâncias										
					Desvio		1,494		Max tab	0,18
SQG=	100,461				Valor extremo		-1,808		Aceita-se a Normalidade	
MQG=	33,487				T maximo		2,64			
MQR=	2,566				Portanto não tem espúrio					
F=	13,050									
F0,05(3,15)	3,098									
Portanto existe diferença entre os tratamentos para 28 dias										

Para comparar as médias, usa-se o Teste de Duncan									
a) Ordenar as médias									
		1	2	3	4				
		43,667	47,720	48,400	48,800				
b) Calcular o desvio padrão combinado									
		1,602							
c) Calcular o desvio padrão das médias									
		1/nh= soma(1/nj)/K			0,167				
		0,653970777			nh=	6			
d) Utilizando a Tabela XII da apostila									
	rk	2	3	4					
	(n-K)=20	2,95	3,58	3,96					
	RK	1,93	2,34	2,59					
Dif entre 1-2		4,05	1 é maior do que 2	Dif entre 1-3		4,73	3 é maior do que 1		
Dif entre 2-3		0,68	2 não difere de 3	Dif entre 2-4		1,08	4 não difere de 2		
Dif entre 3-4		0,40	3 não difere de 4	Dif entre 1-4		5,13	4 é maior do que 1		

Efeito da cinza na resistência à compressão para 28 dias – a/c = 0,52

Comparação do efeito da cinz		Comparação do efeito da cinza na resistência à compressão para 28 dias					
		Resistências à Compressão (MPa)					
		Ref	CBC 10m	CBC 3h	CBC R		
		40,7	41,3	43,7	43,7		
		44,9	43,3	50,0	49,2		
		44,1	42,2	42,5	47,9		
		37,5	47,7	47,2	40,8		
		42,3	40,9	40,5	51,6		
		43,1	43,1	52,3	44,9		
	n	6	6	6	6	Média Geral	
	média grupos	42,10	43,08	46,03	46,35	44,39	
	Sj	2,68	2,45	4,58	3,95	Total Geral	
	Tj	252,60	258,50	276,20	278,10	1065,4	
	n-1	5,00	5,00	5,00	5,00	N total	N-K 20
	Sj^2	7,20	6,02	20,98	15,60	24	
	(n-1)*Sj^2	36,00	30,09	104,91	78,02	Soma	249,02
	log Sj^2	0,86	0,78	1,32	1,19		
	(n-1)logSj^2	4,29	3,90	6,61	5,97	Soma	20,76
	1/(n-1)	0,2	0,2	0,2	0,2		0,8
	(médiacol-média total)	-2,29	-1,31	1,64	1,96		
	nj*(médiacol-média total)^2	31,51	10,27	16,17	23,01		80,96

1- Verificação da normalidade dos resíduos em relação as médias das colunas e da existência de valores espúrios										
	Ref	CBC 10m	CBC 3h	CBC R	i	xi	zi	P x-xi	i/n	diferença
	-1,400	-1,783	-2,333	-2,650	2	-5,533	-1,687	0,046	0,042	0,004
	2,800	0,217	3,967	2,850	3	-4,600	-1,398	0,081	0,125	0,044
	2,000	-0,883	-3,533	1,550	4	-3,533	-1,074	0,141	0,167	0,025
	-4,600	4,617	1,167	-5,550	5	-2,650	-0,805	0,210	0,208	0,002
	0,200	-2,183	-5,533	5,250	6	-2,333	-0,709	0,239	0,250	0,011
	1,000	0,017	6,267	-1,450	7	-2,183	-0,664	0,253	0,292	0,038
					8	-1,783	-0,542	0,294	0,333	0,039
	Verificação da hipótese da igualdade das Variâncias				9	-1,450	-0,441	0,330	0,375	0,045
	Teste de Bartlett				10	-1,400	-0,425	0,335	0,417	0,081
	Para fazer este teste, calcula-se a variância combinada:				11	-0,883	-0,268	0,394	0,458	0,064
					12	0,017	0,005	0,502	0,500	0,002
					13	0,200	0,061	0,524	0,542	0,017
12,451	$S_c^2 = \sum_{j=1}^k (n_j - 1) \cdot S_j^2 / (N - K)$				14	0,217	0,066	0,526	0,583	0,057
	e os valores de B e K1 dados por:				15	1,000	0,304	0,619	0,625	0,006
					16	1,167	0,355	0,639	0,667	0,028
					17	1,550	0,471	0,681	0,708	0,027
2,636	$B = 2,3026 \cdot (v \cdot \log S_c^2 - \sum_{j=1}^k v_j \cdot \log S_j^2)$				18	2,000	0,608	0,728	0,750	0,022
					19	2,800	0,851	0,803	0,792	0,011
					20	2,850	0,866	0,807	0,833	0,027
					21	3,967	1,206	0,886	0,875	0,011
1,75	$K_1 = 1 + \sum_{v_i} \frac{1}{N - K}$				22	4,617	1,403	0,920	0,917	0,003
					23	5,250	1,596	0,945	0,958	0,014
B/K1	1,506				24	6,267	1,905	0,972	1,000	0,028
QQ0,05(3)	7,815				média	0			Dif max	0,081
Como B/K1 é menor que o valor tabelado, aceita-se a hipótese da igualdade das variâncias					Desvio	3,290			Max tab	0,18
SQG=	80,962				Valor extremo	-1,687			Aceita-se a Normalidade	
MQG=	26,987				T maximo	2,64				
MQR=	12,451				Portanto não tem espúrio					
F=	2,168									
F0,05(3,15)	3,098									
Portanto não existe diferença entre os tratamentos para 28 dias										

Para comparar as médias, usa-se o Teste de Duncan							
a) Ordenar as médias		1	2	3	4		
		42,100	43,083	46,033	46,350		
b) Calcular o desvio padrão combinado		3,529					
c) Calcular o desvio padrão das médias		1/nh= soma(1/nj)/K			0,167		
		1,440534237	nh=		6		
d) Utilizando a Tabela XII da apostila							
	rk	2	3	4			
	(n-K)=20	2,95	3,58	3,96			
	RK	4,25	5,16	5,70			
Dif entre 1-2	0,98	1 não difere de 2		Dif entre 1-3	3,93	3 não difere de 1	
Dif entre 2-3	2,95	2 não difere de 3		Dif entre 2-4	3,27	4 não difere de 2	
Dif entre 3-4	0,32	3 não difere de 4		Dif entre 1-4	4,25	4 não difere de 1	

Coeficiente Angular da Absorção Capilar (g/cm²) até 72 h Teste de Hipóteses pelo Método Fatorial

Idade	Mistura (0,44)															
	Ref			CBC - 10m			CBC - 3h			CBC - R						
	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²				
3	0,0932	0,2533	0,0641	0,0343	0,1433	0,2691	0,0724	0,0364	0,1093	0,2563	0,0657	0,0336	0,1613	0,2954	0,0873	0,0440
	0,1600				0,1258				0,1470				0,1341			
7	0,0843	0,2468	0,0609	0,0335	0,1131	0,2361	0,0557	0,0279	0,1122	0,2244	0,0503	0,0252	0,1828	0,3112	0,0968	0,0499
	0,1624				0,1230				0,1122				0,1284			
14	0,0760	0,1952	0,0381	0,0200	0,0953	0,2456	0,0603	0,0317	0,0905	0,2408	0,0580	0,0308	0,1600	0,2949	0,0870	0,0438
	0,1192				0,1503				0,1503				0,1349			
28	0,0978	0,2235	0,0499	0,0254	0,1509	0,2512	0,0631	0,0328	0,1120	0,2342	0,0549	0,0275	0,1332	0,3083	0,0951	0,0484
	0,1256				0,1003				0,1222				0,1752			
60	0,0977	0,2431	0,0591	0,0307	0,0812	0,2364	0,0559	0,0307	0,1157	0,2635	0,0694	0,0352	0,1823	0,3645	0,1329	0,0664
	0,1454				0,1552				0,1477				0,1823			
Σ C	1,1619				1,2384				1,2192				1,5744			

Idade	Mistura (0,48)															
	Ref			CBC - 10m			CBC - 3h			CBC - R						
	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²
3	0,0932	0,2081	0,0433	0,0219	0,1311	0,3008	0,0905	0,0460	0,1624	0,2838	0,0805	0,0411	0,1624	0,2838	0,0805	0,0411
	0,1149				0,1697				0,1214				0,1214			
7	0,1117	0,2060	0,0424	0,0214	0,1361	0,2586	0,0669	0,0335	0,1438	0,2994	0,0897	0,0449	0,1438	0,2994	0,0897	0,0449
	0,0942				0,1225				0,1557				0,1557			
14	0,1042	0,1923	0,0370	0,0186	0,1257	0,3085	0,0951	0,0476	0,1842	0,3180	0,1011	0,0518	0,1842	0,3180	0,1011	0,0518
	0,0881				0,1528				0,1338				0,1338			
28	0,1051	0,2146	0,0461	0,0230	0,1467	0,3164	0,1001	0,0503	0,1649	0,3572	0,1276	0,0642	0,1649	0,3572	0,1276	0,0642
	0,1095				0,1697				0,1923				0,1923			
60	0,1521	0,3108	0,0966	0,0483	0,1432	0,3239	0,1049	0,0532	0,1680	0,3254	0,1059	0,0530	0,1680	0,3254	0,1059	0,0530
	0,1588				0,1806				0,1574				0,1574			
Σ C	1,1319				1,5081				1,5838				1,5838			

Idade	Mistura (0,52)												Total Σ C				
	Ref			CBC - 10m			CBC - 3h			CBC - R							
	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²	C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²		C (g/cm ²)	Σ C	(Σ C) ²	Σ C ²
3	0,1305	0,2912	0,0848	0,0429	0,1594	0,3284	0,1079	0,0540	0,1717	0,3373	0,1137	0,0569	0,1890	0,3638	0,1323	0,0663	3,4714
	0,1607				0,1690				0,1655				0,1748				
7	0,1896	0,3382	0,1144	0,0580	0,2007	0,2785	0,0776	0,0463	0,1704	0,3588	0,1287	0,0645	0,1374	0,3568	0,1273	0,0670	3,4141
	0,1486				0,0778				0,1884				0,2194				
14	0,1741	0,3193	0,1019	0,0514	0,1452	0,3028	0,0917	0,0459	0,1641	0,3253	0,1058	0,0529	0,2015	0,3932	0,1546	0,0773	3,4539
	0,1452				0,1576				0,1613				0,1917				
28	0,1827	0,3623	0,1313	0,0656	0,2251	0,3838	0,1473	0,0759	0,1576	0,3489	0,1217	0,0614	0,1631	0,3558	0,1266	0,0637	3,7134
	0,1796				0,1588				0,1913				0,1927				
60	0,2030	0,3762	0,1415	0,0712	0,1913	0,3912	0,1530	0,0765	0,1796	0,3679	0,1354	0,0677	0,1929	0,3947	0,1558	0,0779	3,9231
	0,1732				0,1998				0,1883				0,2017				
Σ C	1,6872				1,6847				1,7382				1,8642			17,9759	

Teste de Hipótese pelo Modelo Fatorial (Até 60 dias)						
Fonte	SQ	GDL	MQ	F	$F_{0,05}(v_1, v_2)$	
Tratamento	0,08869	59	0,001503	2,05	1,5364482	Os Tratamentos influenciam na Absorção Capilar
Resíduo	0,04401	60	0,000734			
Total	0,13270	119				
Fonte	SQ	GDL	MQ	F	$F_{0,05}(v_1, v_2)$	
A/C	0,04091	2	0,02045	27,88	3,1504113	A relação A/C influencia na Absorção Capilar
Idade	0,00790	4	0,00197	2,69	2,5252151	A Idade influencia na Absorção Capilar
CBC	0,01829	3	0,00610	8,31	2,7580783	A CBC influencia na Absorção Capilar
A/C x Idade	0,00264	8	0,00033	0,45	2,0969683	A A/C x Idade NÃO influenciam na Absorção Capilar
A/C x CBC	0,00834	6	0,00139	1,90	2,254053	A A/C x CBC Não influenciam na Absorção Capilar
Idade x CBC	0,00337	12	0,000281	0,38	1,9173959	A Idade x CBC NÃO influenciam na Absorção Capilar
A/C x Idade x CBC	0,00724	24	0,000302	0,41	1,7001167	A A/C x Idade x CBC NÃO influenciam na Absorção Capilar
Resíduo	0,044013	60	0,000734			
Total	0,13270	119				