

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**JOÃO VICTOR FAZZAN**

**AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR EM CONCRETOS POR MEIO DO FATOR  $k$  DE EFICÁCIA  
CIMENTANTE**

Ilha Solteira  
2017

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**JOÃO VICTOR FAZZAN**

**AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-  
DE-AÇÚCAR EM CONCRETOS POR MEIO DO FATOR  $k$  DE  
EFICÁCIA CIMENTANTE**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência dos Materiais. Área de Conhecimento: Ciência e Engenharia dos Materiais.

Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki  
**Orientador**

Prof. Dr. José Antonio Malmonge  
**Coorientador**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- F287a Fazzan, João Victor.  
Avaliação da reatividade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concretos por meio do fator K de eficácia cimentante / João Victor Fazzan.  
-- Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
306 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Ciência e Engenharia dos Materiais, 2017
- Orientador: Jorge Luis Akasaki  
Co-orientador: José Antonio Malmonge  
Inclui bibliografia
1. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 2. Propriedades elétricas.  
3. Fator K de eficácia cimentante. 4. Material pozolânico. 5. Resistência mecânica à compressão.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA TESE:** Avaliação da reatividade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concretos por meio do fator k de eficácia cimentante

**AUTOR:** JOÃO VICTOR FAZZAN

**ORIENTADOR:** JORGE LUIS AKASAKI

**COORDENADOR:** JOSE ANTONIO MALMONGE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIA DOS MATERIAIS, área: CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JORGE JUÁN PAYÁ BERNABEU  
ICITECH - Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón / Universitat Politècnica de Valencia



Prof. Dr. JOÃO ADRIANO ROSSIGNOLO  
Departamento de Engenharia de Biosistemas / Universidade de São Paulo - USP



Prof. Dr. JORGE IVAN TOBON  
Facultad de Minas / Universidad Nacional de Colombia



Ilha Solteira, 26 de julho de 2017

Dedico este trabalho aos meus pais  
Lazaro e Ortencia, aos meus irmãos  
Zenaide, Alice, Ana, Carlos e Marcos,  
e à minha noiva Fabiana, pelo  
incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade que Ele me concedeu durante esses anos de dedicação, por me mostrar que todos os impossíveis podem se tornar possíveis, e por mostrar que a sabedoria é algo tão precioso e divino. A cada dia reconheço que Tu és o meu maior mestre!

À minha família, por sempre ter me proporcionado todos os bons caminhos para alcançar a sabedoria de Deus e o conhecimento científico; por vivenciar todos os momentos juntos e me apoiando incondicionalmente. Em especial aos meus pais e irmãos, ao qual dedico este trabalho, e também aos cunhados e sobrinhos: Eloísa, Jair, Joceli, Ana Laura, João Marcos, José Felipe, Maria Tereza e Luíz Fernando.

À minha noiva Fabiana, o qual vivenciei tão intensamente esses dois últimos anos de estudos e dedicação, o qual pode expressar de todas as formas o seu apoio, nas orações, nas esperas, e principalmente em mostrar que tudo o que é feito com dedicação, o Senhor coloca-se à frente para que a graça aconteça. À família Salomão, e em especial aos sogros Natalino e Lucia, aos cunhados e sobrinhos Alex, Lucy, Marluce, Nogueira, Felipe, Mayte e Yasmin, pelo incentivo e orações.

Também sou eternamente grato ao meu Orientador Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki e ao meu Coorientador José Antonio Malmonge, que me levaram a entender o quão importante é o conhecimento, além da amizade e profissionalismo compartilhados. Deixo o meu agradecimento ao Professor Luiz Francisco Malmonge, pela orientação na primeira fase deste projeto.

Faço meu agradecimento ao professor Prof. Dr. Jordi Payá, da Universitat Politècnica de València – UPV - Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón – ICITECH, por difundir o conhecimento sem medidas e me apoiar em todos os momentos deste trabalho inovador.

Em especial aos professores Mauro Mitsuuchi Tashima e José Luiz Pinheiro Melges, que expressam suas valiosas contribuições para o crescimento do grupo.

Aos meus amigos Daniela, Fábio, Geferson, George, Janete, Jovane, Marcelo, Nataly, Sonia, Susi e aos servos do Grupo de Oração, que também acreditaram na realização deste projeto e em agradecimento às orações. Também gostaria de agradecer à minha amiga Adriana, por poder compartilhar todas as trajetórias diante desse projeto, demonstrando seu profissionalismo, serenidade, esperança e alegria.

Agradeço ao grupo Materiais Alternativos de Construção (MAC) pelo apoio no desenvolvimento na pesquisa. Em especial aos alunos que também fizeram parte deste projeto (Paulo e Gabriel).

Ao Departamento de Física e Química – DFQ, em especial aos alunos que fizeram parte desta trajetória e que se dispuseram à realização dos diversos ensaios: Alex, Danilo, Elirandrin, Elisa, Fabricia, Geoava, Guilherme, Josi, Maicon, Tiago e Vilches.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, cuja dedicação permitiu a realização dos ensaios desenvolvidos durante o período de estudo: Flávio, Gilson, Natália, Mário, Ozias e Ronaldo.

Aos colegas do grupo MAC, em especial ao João Cláudio, pela disponibilidade na realização dos ensaios de caracterização, além dos colegas Alan, Danilo e Maria Júlia.

Ao Instituto Federal de São Paulo, Câmpus de Presidente Epitácio e Câmpus Avançado de Ilha Solteira; aos colegas, amigos e alunos da Instituição, que sempre apoiaram o desenvolvimento do trabalho. Em especial à minha amiga Verônica, que acompanhou de tão perto a jornada de ser aluno e professor ao mesmo tempo; ao Diretor Wilson José da Silva, pela dedicação e acolhimento no Câmpus Avançado Ilha Solteira e à Instituição IFSP pelo incentivo e concessão do Afastamento para Qualificação.

“O amor de Deus é uma sabedoria digna de ser honrada. Aqueles a quem ela se mostra, amam-na logo que a vêem, logo que reconhecem os prodígios que realiza. A sabedoria distribui a ciência e a prudente inteligência”.

Eclesiástico 1,14-15



## RESUMO

Com a vigente expansão dos canaviais brasileiros, um estudo direcionado para os resíduos provenientes da cana-de-açúcar torna-se imprescindível no cenário atual. Neste sentido, pesquisas estão sendo desenvolvidas para a utilização de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em compósitos cimentícios, sendo que esta cinza é obtida a partir da queima do bagaço que é utilizado como combustível em processos de cogeração de energia. A CBC é predominantemente constituída de dióxido de silício, e esta característica tem conduzido à avaliação da potencialidade pozolânica do material, principalmente em substituição ao cimento Portland. Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse em se determinar o que é conhecido como Fator  $k$  de Eficácia Cimentante, que corresponde a um número que caracteriza o material pozolânico e determina a equivalência entre este e o cimento, do ponto de vista das características aglomerantes, e o seu consequente resultado no desenvolvimento das resistências mecânicas. O coeficiente de eficácia não é único para cada tipo de material, isto é, depende de algumas variáveis como por exemplo a relação água/cimento, proporção entre cimento e pozolana, idade de cura, entre outros parâmetros. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é determinar o fator de eficácia cimentante da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, em termos de resistência mecânica à compressão de microconcretos e concretos. O estudo do fator  $k$  se deu a partir da substituição de cimento Portland por CBC e do incremento no consumo de adição em relação à mistura controle (sem CBC), para relação água/cimento fixa. Também foram realizadas caracterizações físico-químicas da CBC, de pastas de cal/CBC e cimento/CBC, bem como a avaliação da reatividade pozolânica por meio de medidas de condutividade/resistividade e impedância elétricas em argamassas. O caráter pozolânico evidenciado pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi traduzido nas alterações das medidas elétricas ao longo do tempo hidratação. Além disso, os resultados obtidos de eficácia cimentante mostram a influência significativa da relação água/cimento, porcentagem de substituição de CBC e tempo de cura. Foram obtidos valores de  $k$  maiores que um, mostrando que se é possível obter concretos de mesma resistência mecânica, podendo substituir o cimento Portland por um consumo menor de CBC. Além disso, a reatividade do material se mostrou mais efetiva em idades de cura mais avançadas, para teores de substituição de até 20% de CBC em relação à massa de Cimento Portland.

**Palavras-chave:** Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Propriedades Elétricas. Fator  $k$  de Eficácia Cimentante. Material pozolânico. Resistência mecânica à compressão.

## ABSTRACT

A specific study related to the reusing of wastes from sugarcane industry is essential nowadays, mainly due to the increasing on the brazilian sugar cane plantations. On this way, several studies have been performed using sugarcane bagasse ash (SCBA) in cementitious composites, where the SCBA was obtained from the energy cogeneration process. Due to the chemical composition of SCBA, mainly silicon, studies related to its use as pozzolanic material in Portland cement binder have been reported. In the last years, the knowledge about factor  $k$ , that corresponds to a number characterize a pozzolanic material and determines its equivalence with Portland cement (OPC) from mechanical strength point of view, is increasing. Factor  $k$  depends on some variables used in mortars or concretes mixtures such as water/OPC ratio, proportion between OPC and pozzolanic material, curing time, among other parameters. The aim of this work is to assess the factor  $k$  of SCBA from mechanical point of view micro-concretes and concretes. The assessment of factor  $k$  was performed replacing OPC by SCBA and adding SCBA to the control mixture (without SCBA) for a fixed water/OPC ratio. Phisico-chemical characterization of SCBA and its reactivity on calcium hydroxide/SCBA and OPC/SCBA were assessed on pastes. Conductivity/resistivity and electrical impedance measurements were performed on mortar samples. Pozzolanic reactivity of SCBA could be detected by modifications on the conductivity/resistivity and electrical impedance measurements along the curing time. Furthermore, obtained results showed that factor  $k$  present a significantly influence of water/OPC ratio, proportion between OPC and SCBA and curing time. Factor  $k$  values obtained for SCBA were higher than the unit, showing that it is possible to yield concretes with similar mechanical strength replacing OPC by a lower amount of SCBA. In the same way, the reactivity of SCBA was more pronounced for long curing time, replacing up to 20% of OPC by SCBA.

**Keywords:** Sugarcane bagasse ash, Electrical properties, Factor  $k$ , Pozzolanic material, Compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 3.1	Estágios do processo de hidratação do cimento Portland .....	34
Fig. 3.2	Representação esquemática da hipótese que explica o desenvolvimento da hidratação do cimento .....	38
Fig. 3.3	Esquema dos caminhos de condução em pastas de cimento .....	40
Fig. 3.4	Curvas de resistividade elétrica para diferentes relações água/cimento de pastas .....	41
Fig. 3.5	(a) Curva de condutividade e curva derivada correspondente e (b) Curva calorimétrica isotérmica para pastas de Cimento Portland .....	42
Fig. 3.6	Espectro de Impedância esquemático para uma corrente alternada .....	44
Fig. 3.7	Gráfico de capacitância x tempo de hidratação para pastas de cimento com diversos teores de sílica ativa .....	45
Fig. 3.8	Dados experimentais de impedância elétrica obtido para pastas de cimento a partir do método de contato. Espessura da amostra igual a 0,4 cm .....	46
Fig. 3.9	Espectros de impedância de pastas de cimento para diferentes tempos de cura ( $T = 30^{\circ}\text{C}$ ).....	46
Fig. 3.10	Evolução do espectro de impedância para pastas de cimento em função da perda de massa .....	46
Fig. 3.11	Gráficos de Nyquist para pastas produzidas com 90% de cimento Portland e 10% de cinzas vulcânicas naturais e com diversas granulometrias (17, 14 e 6 $\mu\text{m}$ ). Comparação das medidas após 2 e 120 min de hidratação .....	48
Fig. 3.12	Resistência à Compressão de concretos com CBC .....	53
Fig. 3.13	Variação da “eficiência total” pela substituição de cinza volante .....	59
Fig. 3.14	Evolução do fator $k$ ao longo do tempo e em relação ao consumo de escória granulada de alto-forno .....	60
Fig. 3.15	Fator de eficácia do metacaulim (MK) e sílica ativa (SF) .....	61
Fig. 3.16	Comparação dos valores de eficácia cimentante .....	62
Fig. 3.17	Valores de fator $k$ para sílica ativa e cinza da casca de arroz avaliados aos 28 dias de cura a $20^{\circ}\text{C}$ .....	63
Fig. 4.1	Distribuição granulométrica dos agregados .....	65
Fig. 4.2	Evolução da temperatura de queima em função do tempo de autocombustão do bagaço de cana-de-açúcar .....	67
Fig. 4.3	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade em corpos de prova de argamassa de cimento/CBC .....	73
Fig. 4.4	Aparato experimental para medidas de condutividade/resistividade e impedância elétricas .....	74
Fig. 4.5	Mistura de microconcreto após homogeneização .....	75
Fig. 4.6	Diagrama esquemático dos procedimentos experimentais .....	80
Fig. 5.1	Resultados da Difração de Raio-X da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) .....	83
Fig. 5.2	Distribuição granulométrica em porcentagem de volume e acumulada da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).....	84
Fig. 5.3	Espectro de FTIR da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).....	87
Fig. 5.4	Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) .....	88
Fig. 6.1	Resultados da Difração de Raio-X de pastas CH-CBC ao longo do tempo de cura ...	91
Fig. 6.2	Espectro de FTIR para pastas de cal/CBC .....	92
Fig. 6.3	Resultados da Análise Termogravimétrica (curvas DTG) para pastas de cal/CBC ...	93
Fig. 6.4	Micrografias e Espectro EDS para pastas CP e CH-CBC .....	94
Fig. 6.5	Resultados da Difração de Raio-X de pastas CP-CBC ao longo do tempo de cura ...	96
Fig. 6.6	Espectro de FTIR para pastas de cimento/CBC .....	97
Fig. 6.7	Resultados da Análise Termogravimétrica (curvas DTG) para pastas de cimento/CBC .....	99
Fig. 7.1	Nomenclatura para designar as misturas de argamassa .....	104
Fig. 7.2	Influência da porcentagem de CBC na trabalhabilidade de argamassas de cimento Portland (mm).....	105

Fig. 7.3	Coeficiente entre Resistências à Compressão para argamassas em função do teor de substituição de CBC e tempo de cura .....	108
Fig. 7.4	Porcentagem do Ganho de Resistência (SG%) de Misturas de Argamassa constituídas de CBC .....	110
Fig. 7.5	Evolução da absorção de água por capilaridade em argamassas, em função do teor de CBC e tempo de ensaio .....	112
Fig. 7.6	Porcentagem de redução dos valores de absorção de água por capilaridade para argamassas, em função do teor de CBC e tempo de ensaio .....	113
Fig. 7.7	Esquema do método de duas pontas para medidas de condutividade $dc$ das amostras .....	114
Fig. 7.8	Condutividade Elétrica das misturas de argamassa, em função do teor de substituição de CBC e tempo de cura .....	116
Fig. 7.9	Resultados de resistividade elétrica de argamassas, ao longo do tempo de cura e para os diversos teores de CBC .....	119
Fig. 7.10	Correlação entre Resistência à Compressão e Resistividade Elétrica para argamassas de cimento Portland, em função do teor de substituição de cimento por CBC, para 3, 7 e 28 dias de cura .....	121
Fig. 7.11	Representação da impedância complexa no plano imaginário .....	124
Fig. 7.12	Curva de Capacitância em função do tempo de hidratação de argamassas com diversos consumos de CBC .....	127
Fig. 7.13	Curvas de Nyquist para argamassas de cimento Portland, em função da porcentagem de CBC .....	130
Fig. 7.14	Curvas de Nyquist para argamassas de cimento Portland e CBC, em função do tempo de cura .....	132
Fig. 7.15	Módulo de Impedância para argamassas de cimento Portland, em função do tempo de cura e porcentagem de CBC .....	133
Fig. 7.16	Correlação entre Resistência à Compressão e Módulo de Impedância para argamassas de cimento Portland, em função do teor de substituição de cimento por CBC .....	134
Fig. 8.1	Nomenclatura para designar as misturas de microconcreto .....	140
Fig. 8.2	Ensaio de Mini-Slump (a) e Mesa de Consistência “Flow Table” (b) aplicados às misturas de Microconcretos .....	143
Fig. 8.3	Trabalhabilidade de Microconcretos constituídos de CBC – Influência da porcentagem de aditivo Superplastificante em função da relação $a/cm$ .....	144
Fig. 8.4	Evolução da Resistência à Compressão de Microconcretos com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland, aos 7, 28, 90, 180 e 365 dias de cura .....	147
Fig. 8.5	Influência do tempo de cura, relação $a/cm$ e porcentagem de CBC nos Coeficientes $R_{c\text{ poz.}} / R_{c\text{ contr.}}$ de Microconcretos .....	151
Fig. 8.6	Porcentagem do Ganho de Resistência (SG%) de Misturas de Microconcretos com 15% e 30% de CBC .....	154
Fig. 8.7	Coeficiente de porcentagem do aumento de resistência mecânica entre 28 e 90 dias de cura. ....	156
Fig. 8.8	Coeficiente entre resistências mecânicas para microconcretos com CBC aos 28 dias de cura e microconcretos controle aos 90 dias de cura .....	157
Fig. 8.9	Exemplificação da definição do Fator $k$ de Eficácia Cimentante .....	159
Fig. 8.10	Exemplificação da Interpretação Física do Fator $k$ de Eficácia Cimentante .....	161
Fig. 8.11	Curvas Teóricas $R_c$ x $a/c$ ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Logarítmico .....	167
Fig. 8.12	Curvas Teóricas $R_c$ x $a/c$ ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Potencial .....	168
Fig. 8.13	Curvas Teóricas $R_c$ x $a/c$ ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Linear .....	169
Fig. 8.14	Curvas Teóricas $R_c$ x $a/c$ ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Proposto por Alaejos e Fernández (1999) .....	170

Fig. 8.15	Influência da relação a/c, tempo de cura e porcentagem de CBC nos valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo Logarítmico .....	173
Fig. 8.16	Influência da relação a/c, tempo de cura e % de CBC nos valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo Potencial .....	175
Fig. 8.17	Influência da relação a/c, tempo de cura e % de CBC nos valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo Linear .....	177
Fig. 8.18	Influência da relação a/c, tempo de cura e % de CBC nos valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999) .....	179
Fig. 8.19	Comportamento do Fator $k$ de Eficácia Cimentante (Modelo de Ajuste Potencial) para Microconcretos em função da relação (a/c), e do teor de substituição de CBC .....	180
Fig. 8.20	Valores de Fator $k$ (Modelo de Ajuste Potencial) para Microconcretos em função da relação (a/c) <sub>r</sub> e do teor de substituição de CBC .....	182
Fig. 9.1	Determinação do coeficiente de eficácia cimentante ( $k$ ) da cinza volante .....	189
Fig. 9.2	Modelo Gráfico para determinação do coeficiente $k$ de eficácia cimentante .....	190
Fig. 9.3	Nomenclatura utilizada para designar as misturas de microconcreto .....	192
Fig. 9.4	Porcentagem de aditivo Superplastificante em função do consumo de CBC para manter a mesma trabalhabilidade de Microconcretos do grupo de misturas M – 54C – B, M – 36C – B e M – 29C – B .....	198
Fig. 9.5	Porcentagem de aditivo Superplastificante em função do consumo de CBC para manter a mesma trabalhabilidade de Microconcretos para os grupos de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B .....	198
Fig. 9.6	Coefficiente entre resistências à compressão para misturas com mínimo consumo de cimento e máximo consumo de CBC, para o grupo de misturas M – 54C – B, M – 36C – B e M – 29C – B .....	202
Fig. 9.7	Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de mistura M – 54C – B .....	203
Fig. 9.8	Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de mistura M – 36C – B .....	204
Fig. 9.9	Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de mistura M – 29C – B .....	204
Fig. 9.10	Coefficiente entre resistências à compressão para misturas com mínimo consumo de cimento e máximo consumo de CBC, para o grupo de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B .....	207
Fig. 9.11	Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-180 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de misturas M – 36C – B .....	208
Fig. 9.12	Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-180 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de misturas M – 72C – B .....	209
Fig. 9.13	Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-180 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de misturas M – 108C – B .....	209
Fig. 9.14	Correlação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Relação a/cm ( $R_{c(a/cm)}$ ) e Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de Material Pozolânico ( $R_{c(p)}$ ).....	213
Fig. 9.15	Porcentagem de aditivo Superplastificante em função do consumo de Material Inerte para manter a mesma trabalhabilidade de Microconcretos dos grupos de mistura M – 36C – B e M – 36C – I .....	216
Fig. 9.16	Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC e Quartzo triturado .....	218

Fig. 9.17	Representação dos Efeitos Físicos e Químicos do Quartzo triturado e CBC ao longo do tempo de cura .....	219
Fig. 9.18	Curvas Teóricas $R_c$ x $p$ ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 54C – B .....	224
Fig. 9.19	Curvas Teóricas $R_c$ x $p$ ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 36C – B .....	225
Fig. 9.20	Curvas Teóricas $R_c$ x $p$ ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 29C – B .....	225
Fig. 9.21	Curvas Teóricas $R_c$ x $p$ ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 72C – B .....	226
Fig. 9.22	Curvas Teóricas $R_c$ x $p$ ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 108C – B .....	226
Fig. 9.23	Comparação do Fator $k$ de eficácia cimentante entre os Modelos “Resistência à Compressão x Relação a/c” e “Resistência à Compressão x Consumo CBC”, para diferentes relações água/cimento dos traços controle .....	231
Fig. 9.24	Comparação do Fator $k$ de eficácia cimentante entre os Modelos “Resistência à Compressão x Relação a/c” e “Resistência à Compressão x Consumo CBC”, para traço controle com relação água/cimento igual a 0,5.....	234
Fig. 9.25	Curvas Teóricas $R_c$ x $p$ ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 36C – I .....	237
Fig. 9.26	Relação entre o Consumo “ $p$ ” de CBC e o consumo de “Cimento Equivalente”, em termos de Resistência Mecânica à Compressão .....	244
Fig. 9.27	Resultados dos Valores de fator $k$ em função do consumo “ $p$ ” de CBC por meio do método de “Cimento Equivalente” .....	245
Fig. 9.28	Correlação entre o Fator $k$ de eficácia cimentante em termos de “Resistência à Compressão x Consumo de CBC” e “Cimento Equivalente” .....	250
Fig. 9.29	Relação entre o Consumo “ $i$ ” de Quartzo triturado e o consumo de “Cimento Equivalente”, em termos de Resistência Mecânica à Compressão .....	254
Fig. 9.30	Resultados dos Valores de fator $k$ em função do consumo “ $i$ ” de Material Inerte por meio do método de “Cimento Equivalente” .....	255
Fig. 10.1	Nomenclatura utilizada para designar as misturas de concreto .....	258
Fig. 10.2	Trabalhabilidade de Microconcretos constituídos de CBC – Influência da porcentagem de aditivo Superplastificante em função da relação a/cm .....	261
Fig. 10.3	Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test) aplicado às misturas de Concretos .....	262
Fig. 10.4	Evolução da Resistência à Compressão Axial de Concretos com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland, aos 7, 28 e 90 dias de cura .....	264
Fig. 10.5	Comparação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos e Concretos com adição de CBC .....	266
Fig. 10.6	Correlação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos e Concretos .....	268
Fig. 10.7	Influência do tempo de cura, relação a/cm e % de CBC nos Coeficientes $R_{c\text{ poz.}} / R_{c\text{ contr.}}$ de Concretos .....	269
Fig. 10.8	Influência do tempo de cura, relação a/cm e % de CBC na Porcentagem de Ganho de Resistência (SG) de Concretos .....	271
Fig. 10.9	Curvas Teóricas $R_c$ x a/c ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Potencial .....	274
Fig. 10.10	Influência da relação a/c, tempo de cura e porcentagem de CBC nos valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Concretos – Modelo Potencial .....	276
Fig. 10.11	Comparação do Fator $k$ de eficácia cimentante em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” para misturas de Concreto (C) e Microconcreto (M) ...	278
Fig. 10.12	Relação entre a eficácia cimentante de Microconcretos e Concretos, em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” .....	280
Fig. 10.13	Relação entre a Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência à Compressão, obtida a partir dos dados experimentais. ....	283

Fig. 10.14	Relação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral ( $f_t$ ) e resistência à compressão axial ( $f_c$ ) de Concretos .....283
Fig. 10.15	Porcentagem de Incremento ou redução dos valores de módulo de elasticidade de concretos com CBC, em função da relação a/cm, teor de CBC e idade de cura .....286
Fig. 10.16	Relação entre Módulo de Elasticidade e Resistência à Compressão, obtida a partir dos dados experimentais, e curvas obtidas a partir de modelos teóricos .....288
Fig. 10.17	Porcentagem de redução dos valores de absorção de água por imersão para concretos com CBC, em função da relação a/cm, teor de CBC e idade de cura .....291

## LISTA DE TABELAS

Tab. 3.1	Percentual de óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e PF nas cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em diversas pesquisas .....	51
Tab. 3.2	Valores de fator <i>k</i> de eficácia cimentante com base nas normas BS EN 206:2013 e EHE-08 .....	58
Tab. 4.1	Propriedades físicas dos agregados .....	65
Tab. 5.1	Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (em porcentagem).....	82
Tab. 5.2	Diâmetro médio, $d(0,1)$ , $d(0,5)$ e $d(0,9)$ da cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	85
Tab. 5.3	Superfície Específica Blaine da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e Cimento Portland .....	85
Tab. 5.4	Massa Específica Absoluta e Aparente da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) .....	86
Tab. 6.1	Proporções utilizadas em pastas de cal/CBC .....	90
Tab. 6.2	Perda de água total (PT), perda devido à desidratação do hidróxido de cálcio (PH), perda de hidratos (% de água combinada) e % de cal fixada das amostras cal/CBC aos 7 e 28 dias de cura .....	94
Tab. 6.3	Proporções utilizadas em pastas de cimento/CBC .....	96
Tab. 6.4	Perda de água total (PT), perda devido à desidratação do hidróxido de cálcio (PH), perda de hidratos (% de água combinada) e % de cal fixada das amostras cimento/CBC aos 7 e 28 dias de cura .....	100
Tab. 6.5	Consumo de materiais para argamassas de cal/CBC .....	100
Tab. 6.6	Abertura de consistência para argamassas de cal/CBC .....	101
Tab. 6.7	Resistência Mecânica à Compressão para argamassas de cal/CBC .....	101
Tab. 7.1	Dosagens de Argamassas para variações nas porcentagens de CBC .....	104
Tab. 7.2	Diâmetro de abertura de consistência de argamassas em CBC (cm). .....	105
Tab. 7.3	Resistência à Compressão de Argamassas em função do teor de substituição de CBC e tempo de cura .....	107
Tab. 7.4	Absorção de Água por Capilaridade de Argamassas com adição de 0%, 15%, 30% e 50% de CBC em relação à massa de Cimento Portland, aos 28 dias de cura .....	112
Tab. 7.5	Parâmetros de ajuste logarítmico para correlação entre os dados de resistência à compressão e resistividade elétrica de argamassas .....	120
Tab. 7.6	Parâmetros de ajuste logarítmico para correlação entre os dados de resistência à compressão e resistividade elétrica de argamassas .....	122
Tab. 7.7	Parâmetros de ajuste logarítmico para correlação entre os dados de Resistência à Compressão e Módulo de Impedância de argamassas .....	135
Tab. 8.1	Dosagens de Microconcretos para Misturas sem adição de CBC (Controle) .....	140
Tab. 8.2	Dosagens de Microconcretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B15) .....	140
Tab. 8.3	Dosagens de Microconcretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B30) .....	141
Tab. 8.4	Trabalhabilidade de Microconcretos para Misturas com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland .....	142
Tab. 8.5	Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Microconcretos em função da porcentagem de Superplastificante e relação a/cm .....	144
Tab. 8.6	Resistência à Compressão de Microconcretos para Misturas sem adição de CBC (Controle).....	146
Tab. 8.7	Resistência à Compressão de Microconcretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B15) .....	146
Tab. 8.8	Resistência à Compressão de Microconcretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B30) .....	146
Tab. 8.9	Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Microconcretos Controle e com 15% de CBC .....	150
Tab. 8.10	Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Microconcretos Controle e com 30% de CBC .....	150



Tab. 8.11	Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Microconcretos com 15% de CBC .....	153
Tab. 8.12	Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Microconcretos com 30% de CBC .....	153
Tab. 8.13	Parâmetros de Ajuste Logarítmico, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator $k$ de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação $a/c$ .....	162
Tab. 8.14	Parâmetros de Ajuste Potencial, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator $k$ de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação $a/c$ .....	163
Tab. 8.15	Parâmetros de Ajuste Linear, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator $k$ de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação $a/c$ .....	164
Tab. 8.16	Parâmetros de Ajuste do Modelo proposto por Alaejos, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator $k$ de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação $a/c$ .....	165
Tab. 8.17	Valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e $(a/c)_r$ – Modelo Logarítmico .....	172
Tab. 8.18	Valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e $(a/c)_r$ – Modelo Potencial .....	174
Tab. 8.19	Valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e $(a/c)_r$ – Modelo Linear .....	176
Tab. 8.20	Valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e $(a/c)_r$ – Modelo Alaejos .....	178
Tab. 9.1	Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,3$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 54C – B) .....	193
Tab. 9.2	Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,5$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 36C – B) .....	193
Tab. 9.3	Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,65$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 29C – B) .....	193
Tab. 9.4	Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,5$ , demais traços com 20% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 72C – B) .....	194
Tab. 9.5	Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,5$ , demais traços com 30% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 108C – B) .....	194
Tab. 9.6	Trabalhabilidade de Microconcretos com Adição de Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar para diferentes % de redução de cimento Portland .....	195
Tab. 9.7	Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Microconcretos em função da porcentagem de Superplastificante e Consumo de CBC .....	197
Tab. 9.8	Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,3$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 54C – B).....	200
Tab. 9.9	Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,5$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 36C – B).....	200
Tab. 9.10	Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm=0,65$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 29C – B).....	200
Tab. 9.11	Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,5$ , demais traços com 20% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 72C – B).....	205
Tab. 9.12	Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com $a/cm = 0,5$ , demais traços com 30% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 108C – B).....	206

Tab. 9.13	Comparação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Relação a/cm e Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de Material Pozolânico ..... 211
Tab. 9.14	Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com a/cm = 0,5, demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de Inerte (M – 36C – I)..... 214
Tab. 9.15	Trabalhabilidade de Microconcretos com Adição de Material Inerte ..... 215
Tab. 9.16	Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Microconcretos em função da porcentagem de Superplastificante e consumo de Material Inerte ..... 216
Tab. 9.17	Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com a/cm=0,5, demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de Inerte..... 217
Tab. 9.18	Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator <i>k</i> de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Consumo de Pozolana ..... 222
Tab. 9.19	Resultados dos Valores de fator <i>k</i> para Microconcretos com CBC em termos de Resistência à Compressão e Consumo de CBC adicionado ..... 228
Tab. 9.20	Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator <i>k</i> de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Consumo de Material Inerte ..... 236
Tab. 9.21	Dosagens de Microconcretos para obtenção do fator <i>k</i> de eficácia da CBC em termos do consumo de “Cimento Equivalente” ..... 240
Tab. 9.22	Resistência à Compressão de Microconcretos para obtenção do fator <i>k</i> de eficácia da CBC em termos do consumo de “Cimento Equivalente” ..... 241
Tab. 9.23	Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Correlação para avaliação do fator <i>k</i> de microconcretos com CBC em termos de “Cimento Equivalente” ..... 242
Tab. 9.24	Resultados dos Valores de fator <i>k</i> de eficácia cimentante para Microconcretos com CBC em termos de Resistência à Compressão e Consumo de CBC adicionado, pelo conceito de “Cimento Equivalente” ..... 243
Tab. 9.25	Comparação dos Resultados de fator <i>k</i> para Microconcretos com CBC em relação às metodologias 1, 2 e 3. .... 249
Tab. 9.26	Dosagens de Microconcretos com Adição de Inerte para obtenção do consumo de “Cimento Equivalente” ..... 251
Tab. 9.27	Resistência à Compressão de Microconcretos para obtenção do consumo de “Cimento Equivalente” ..... 252
Tab. 9.28	Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Correlação para avaliação do fator <i>k</i> de microconcretos com CBC em termos “Cimento Equivalente” ..... 252
Tab. 9.29	Resultados dos Valores de “Cimento Equivalente” fator <i>k</i> de eficácia cimentante para Microconcretos com Quartzo Ultrafino em termos de Resistência à Compressão e Consumo de inerte adicionado ..... 253
Tab. 10.1	Dosagens de Concretos para Misturas sem adição de CBC (Controle) ..... 259
Tab. 10.2	Dosagens de Concretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B15) ..... 259
Tab. 10.3	Dosagens de Concretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B30) ..... 259
Tab. 10.4	Trabalhabilidade de Concretos para Misturas com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland ..... 260
Tab. 10.5	Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Concretos em função da porcentagem de Superplastificante e relação a/cm ..... 261
Tab. 10.6	Resistência à Compressão Axial de Concretos para Misturas sem adição de CBC (Controle)..... 263
Tab. 10.7	Resistência à Compressão de Concretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B15) ..... 263
Tab. 10.8	Resistência à Compressão de Concretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B30) ..... 263

Tab. 10.9	Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Concretos Controle e com 15% de CBC .....	268
Tab. 10.10	Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Concretos Controle e com 30% de CBC .....	269
Tab. 10.11	Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Concretos com 15% de CBC .....	270
Tab. 10.12	Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Concretos com 30% de CBC .....	271
Tab. 10.13	Parâmetros de Ajuste Potencial, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator $k$ de Concretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação $a/c$ .....	273
Tab. 10.14	Valores de fator $k$ de eficiência cimentante de Concretos em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e $(a/c)_r$ – Modelo Potencial .....	275
Tab. 10.15	Resistência à Tração por Compressão Diametral de Concretos com adição de 0% (C – C), 15% (C – B15) e 30% (C – B30) de CBC em relação à massa de Cimento Portland .....	281
Tab. 10.16	Módulo de Elasticidade de Concretos com adição de 0% (C – C), 15% (C – B15) e 30% (C – B30) de CBC em relação à massa de Cimento Portland .....	285
Tab. 10.17	Absorção de Água por Imersão de Concretos com adição de 0% (C – C), 15% (C – B15) e 30% (C – B30) de CBC em relação à massa de Cimento Portland .....	289

## LISTA DE ABREVIACÕES

a/c – Relação água/cimento

a/cm – Relação água/aglomerante

(a/c)r - Relação água/cimento efetiva

(a/c)x - Relação água/cimento da mistura com pozolana

ag – Agregado

C-A-H - Aluminatos de cálcio hidratados

C-A-S-H - Silicoaluminatos de cálcio hidratados

C-S-H - Silicatos de cálcio hidratados

CBC – Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

CH – Cal hidratada

Contr. – Misturas controle

DRX - Difração de Raios X

EDS - Espectroscopia Dispersiva de Energia

EIE – Espectroscopia de Impedância Elétrica

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

IAR – Índice de Atividade Resistente

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

Poz. – Pozolana

Rc – Resistência Mecânica à Compressão

## SUMÁRIO

<b>I</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
1.1	IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA .....	26
1.2	ESTRUTURA DA TESE .....	28
<b>II</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>29</b>
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL .....	29
2.1.2	Objetivos Específico .....	29
<b>III</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>30</b>
3.1	CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND .....	30
3.1.1	O concreto como material de construção .....	30
3.1.2	O cimento Portland .....	30
3.1.3	O processo de hidratação do cimento Portland .....	32
3.2	ADIÇÕES MINERAIS .....	36
3.2.1	Materiais Pozolânicos .....	36
3.2.2	Reações Pozolânicas .....	36
3.3	PROPRIEDADES ELÉTRICAS .....	38
3.3.1	Condutividade e Resistividade Elétrica .....	38
3.3.2	A influência das medidas de condutividade e resistividade em pastas, argamassas e concretos de cimento Portland .....	39
3.3.3	Impedância Elétrica .....	43
3.3.4	A influência das medidas de impedância elétrica em pastas, argamassas e concretos de cimento Portland .....	44
3.4	A CANA-DE-AÇÚCAR .....	48
3.4.1	Produção e processamento para obtenção do bagaço .....	48
3.4.2	Aplicações da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em matrizes cimentícias .....	50
3.5	O FATOR DE EFICÁCIA CIMENTANTE DE POZOLANAS .....	55
3.5.1	Fator <i>k</i> de eficácia cimentante - definições e princípios .....	55
3.5.2	Aplicações envolvendo a eficácia cimentante de materiais pozolânicos e hidráulicos .....	56
<b>IV</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>64</b>
4.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	64
4.1.1	Cimento Portland .....	64
4.1.2	Cal Hidratada .....	64
4.1.3	Agregados .....	64
4.1.4	Água de amassamento .....	65
4.1.5	Aditivo Químico .....	65
4.1.6	Bagaço da cana-de-açúcar .....	66
4.1.7	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	66
4.1.8	Quartzo triturado .....	66
4.1.9	Capacitores .....	66
4.2	EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	66
4.2.1	Produção da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBC) .....	66
4.2.2	Produção do Quartzo Triturado .....	68
4.2.3	Técnicas para caracterização da CBC .....	68
4.2.3.1	<i>Fluorescência de Raios X (FRX) e Perda ao Fogo</i> .....	68
4.2.3.2	<i>Difração de Raios X (DRX)</i> .....	69
4.2.3.3	<i>Granulometria por Difração à Laser (ADL)</i> .....	69
4.2.3.4	<i>Superfície Específica Blaine e Massa Específica</i> .....	69
4.2.3.5	<i>Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	69
4.2.3.6	<i>Análise Termogravimétrica</i> .....	69
4.2.3.7	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	70
4.2.4	Produção e caracterização de Pastas de Cal/CBC e Cimento/CBC .....	70
4.2.5	Produção e ensaios aplicados às argamassas de cal/CBC e cimento/CBC .....	70
4.2.5.1	<i>Mistura</i> .....	71
4.2.5.2	<i>Ensaio de consistência, adensamento, cura e capeamento dos corpos de prova</i> .....	71
4.2.5.3	<i>Ensaio de Resistência à Compressão</i> .....	72

4.2.5.4	<i>Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade</i> .....	72
4.2.6	Aparato experimental para medidas de condutividade/resistividade e impedância elétricas....	73
4.2.7	Produção e ensaios aplicados aos corpos de prova de microconcreto .....	74
4.2.7.1	<i>Mistura</i> .....	75
4.2.7.2	<i>Ensaio de Consistência</i> .....	75
4.2.7.3	<i>Adensamento, cura e capeamento dos corpos de prova</i> .....	76
4.2.7.4	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Axial</i> .....	76
4.2.8	Produção e ensaios aplicados aos corpos de prova de concreto .....	76
4.2.8.1	<i>Mistura</i> .....	77
4.2.8.2	<i>Ensaio de Consistência</i> .....	77
4.2.8.3	<i>Adensamento, cura e capeamento dos corpos de prova</i> .....	77
4.2.8.4	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Axial</i> .....	77
4.2.8.5	<i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral</i> .....	78
4.2.8.6	<i>Ensaio do Módulo de Elasticidade</i> .....	78
4.2.8.7	<i>Ensaio de Absorção de Água por Imersão</i> .....	78
4.2.8.8	<i>Etapas do Programa Experimental</i> .....	79
<b>V</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>81</b>
<b>PARTE 1</b>	<b>Caracterização Físico-Química da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar</b> .....	<b>82</b>
5.1	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) .....	82
5.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (FRX) .....	83
5.3	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER (ADL) .....	84
5.4	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE E MASSA ESPECÍFICA .....	85
5.5	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	86
5.6	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	88
5.7	CONCLUSÕES.....	89
<b>PARTE 2</b>	<b>Estudo da Reatividade Pozolânica da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar</b> .....	<b>90</b>
6.1	PASTAS DE CAL/CBC .....	90
6.1.1	Difração de Raios X (DRX) .....	90
6.1.2	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) .....	91
6.1.3	Análise Termogravimétrica .....	93
6.1.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	94
6.2	PASTAS DE CIMENTO/CBC .....	96
6.2.1	Difração de Raios X (DRX) .....	96
6.2.2	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) .....	97
6.2.3	Análise Termogravimétrica .....	98
6.3	ARGAMASSAS DE CAL/CBC – DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	100
6.3.1	Produção das Argamassas.....	100
6.3.2	Resultados das Argamassas .....	101
6.4	CONCLUSÕES.....	102
<b>PARTE 3</b>	<b>Avaliação do caráter pozolânico da CBC através de propriedades mecânicas e elétricas</b> .....	<b>103</b>
7.1	ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS À BASE DE CIMENTO PORTLAND E CBC.....	103
7.1.1	Nomenclatura e Dosagem para produção de Argamassas .....	103
7.1.2	Trabalhabilidade .....	105
7.1.3	Resistência Mecânica à Compressão .....	106
7.1.4	Coeficiente entre Resistências à Compressão de Argamassas .....	108
7.1.5	Ganho de Resistência para Argamassas com CBC .....	110
7.1.6	Absorção de Água por Capilaridade .....	111

7.2	ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS EM ARGAMASSAS À BASE DE CIMENTO PORTLAND E CBC.....	114
7.3	CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	114
7.3.1	Métodos de Duas Pontas (MDP) - Tensão x Corrente .....	114
7.3.2	Resultados de Condutividade/ Resistividade Elétrica .....	116
7.3.3	Correlação entre Resistência à Compressão e Resistividade Elétrica .....	121
7.4	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA (EIE) .....	123
7.4.1	Conceitos de Impedância no plano complexo, funções dielétricas e espectros .....	124
7.4.2	Resultados das Medidas de Capacitância.....	126
7.4.3	Diagramas de Nyquist .....	129
7.4.4	Módulo de Impedância $ Z^* $ .....	132
7.4.5	Correlação entre Resistência à Compressão e Módulo de Impedância Elétrica .....	134
7.5	CONCLUSÕES.....	135

**PARTE 4 O Coeficiente k de Eficácia Cimentante da CBC por meio da produção de Microconcretos e em termos de Resistência Mecânica à Compressão x Relação**

	<b>Água/Cimento .....</b>	<b>137</b>
8.1	DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MICROCONCRETOS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO (A/CM).....	137
8.1.1	Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Microconcretos.....	137
8.1.2	Trabalhabilidade.....	141
8.1.3	Resistência Mecânica à Compressão .....	145
8.1.4	Coeficiente entre Resistências à Compressão de Microconcretos.....	149
8.1.5	Ganho de Resistência para Microconcretos com CBC.....	152
8.1.6	Coeficiente entre as Resistências à Compressão aos 28 dias e 90 dias .....	155
8.2	MODELO DE CÁLCULO DO FATOR DE $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE.....	157
8.3	MODELOS DE AJUSTE DAS CURVAS RC X A/C.....	161
8.3.1	Ajuste Logarítmico.....	161
8.3.2	Ajuste Potencial.....	162
8.3.3	Ajuste Linear .....	163
8.3.4	Modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999).....	164
8.3.5	Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação ....	165
8.4	CURVAS TEÓRICAS RC X A/C AJUSTADAS AOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	166
8.4.1	Modelo Logarítmico.....	166
8.4.2	Modelo Potencial.....	167
8.4.3	Modelo Linear .....	168
8.4.4	Modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999).....	169
8.4.5	Avaliação das Curvas teóricas ajustadas sobre os dados experimentais.....	170
8.5	RESULTADOS DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE.....	171
8.5.1	Modelo Logarítmico.....	171
8.5.2	Modelo Potencial.....	173
8.5.3	Modelo Linear .....	175
8.5.4	Modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999).....	177
8.5.5	Escolha do método de ajuste mais viável.....	179
8.5.6	Discussão dos resultados obtidos.....	180
8.5.6.1	<i>Influência da relação água/cimento .....</i>	<i>182</i>
8.5.6.2	<i>Influência da porcentagem de substituição de cimento por CBC .....</i>	<i>183</i>
8.5.6.3	<i>Influência do tempo de cura .....</i>	<i>184</i>
8.5.6.4	<i>Efeitos de diluição e nucleação .....</i>	<i>185</i>
8.5.6.5	<i>Influência da portlandita disponível para as reações .....</i>	<i>186</i>
8.6	CONCLUSÕES.....	187

**PARTE 5 O Coeficiente k de Eficácia Cimentante da CBC por meio da produção de Microconcretos e em termos de Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de CBC**

	.....	<b>188</b>
--	-------	------------

9.1	MODELO DE CÁLCULO DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE .....	188
9.2	DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MICROCONCRETOS EM RELAÇÃO AO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND REDUZIDO E CBC ADICIONADO.....	191
9.2.1	Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Microconcretos.....	191
9.2.2	Trabalhabilidade .....	194
9.2.3	Resistência Mecânica à Compressão .....	199
9.3	DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MICROCONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAL INERTE .....	214
9.3.1	Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Microconcretos .....	214
9.3.2	Trabalhabilidade.....	214
9.3.3	Resistência Mecânica à Compressão .....	214
9.4	CÁLCULO DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE PARA MICROCONCRETOS COM ADIÇÃO DE CBC .....	221
9.4.1	Modelos de Ajuste das Curvas $R_c \times p$ .....	221
9.4.2	Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação ....	222
9.4.3	Curvas Teóricas “ $R_c \times$ Consumo de CBC” ajustadas aos dados experimentais.....	223
9.4.4	Avaliação das Curvas Teóricas “ $R_c \times$ Consumo de CBC” ajustadas aos dados experimentais .....	227
9.4.5	Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante.....	228
9.4.6	Discussão dos resultados obtidos.....	229
9.4.7	Comparação do Fator $k$ de Eficácia Cimentante entre os Modelos “Resistência à Compressão x Relação $a/c$ ” e “Resistência à Compressão x Consumo de CBC” .....	231
9.5	CÁLCULO DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE PARA MICROCONCRETOS COM ADIÇÃO DE INERTE .....	235
9.5.1	Modelos de ajuste das curvas “ $R_c \times$ Consumo de Inerte” .....	235
9.5.2	Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação ....	236
9.5.3	Curvas Teóricas “ $R_c \times$ Consumo de Inerte” ajustadas aos dados experimentais .....	237
9.5.4	Avaliação das curvas teóricas “ $R_c \times$ Consumo de Inerte” ajustadas aos dados experimentais.....	
9.5.5	Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante.....	238
9.6	O CONCEITO DE “CIMENTO EQUIVALENTE” PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE DA CBC.....	238
9.6.1	Modelo de Cálculo do Fator $k$ de Eficácia Cimentante .....	238
9.6.2	Dosagem das misturas de Microconcreto .....	239
9.6.3	Resistência Mecânica à Compressão .....	240
9.6.4	Parâmetros de ajuste das curvas $R_c \times a/c$ .....	241
9.6.5	Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação ....	242
9.6.6	Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante.....	242
9.6.7	Discussão dos resultados obtidos.....	243
9.7	O CONCEITO DE “CIMENTO EQUIVALENTE” PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE DO QUARTZO TRITURADO .....	250
9.7.1	Dosagem das misturas de Microconcreto .....	251
9.7.2	Resistência Mecânica à Compressão .....	251
9.7.3	Parâmetros de ajuste das curvas $R_c \times a/c$ .....	252
9.7.4	Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante.....	253
9.7.5	Discussão dos resultados obtidos.....	253
9.8	CONCLUSÕES.....	256

**PARTE 6 O Coeficiente  $k$  de Eficácia Cimentante da CBC por meio da produção de  
Concretos e em termos de Resistência Mecânica à Compressão x Relação Água/Cimento  
..... 257**

10.1	DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETOS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO.....	257
10.1.1	Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Concretos.....	257
10.1.2	Trabalhabilidade .....	259



10.1.3	Resistência Mecânica à Compressão Axial.....	262
10.1.4	Coefficiente entre Resistências à Compressão de Concretos .....	268
10.1.5	Ganho de Resistência para Concretos com CBC .....	270
10.2	<b>CÁLCULO DO FATOR <math>k</math> DE EFICÁCIA CIMENTANTE PARA CONCRETOS COM ADICÃO DE CBC .....</b>	<b>272</b>
10.2.1	Modelos de ajuste das curvas $R_c$ x $a/c$ .....	272
10.2.2	Curvas Teóricas $R_c$ x $a/c$ ajustadas aos dados Experimentais.....	274
10.3	<b>RESULTADOS DO FATOR <math>k</math> DE EFICÁCIA CIMENTANTE .....</b>	<b>275</b>
10.3.1	Comparação do Fator $k$ de Eficácia Cimentante em termos de “Resistência à Compressão x Relação $a/c$ ” para Concretos e Microconcretos.....	278
10.4	<b>OUTRAS PROPRIEDADES APLICADAS AOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>280</b>
10.4.1	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	280
10.4.2	Módulo de Elasticidade .....	284
10.4.3	Absorção de Água por Imersão .....	288
10.5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>291</b>
<b>VI</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>292</b>
11.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	292
11.2	TRABALHOS FUTUROS .....	295
<b>VII</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>296</b>

# Capítulo I

---

## Introdução

### 1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

O conjunto dos produtos formados após as reações químicas de hidratação do cimento Portland confere ao material cimentício endurecido as propriedades que fazem do cimento o aglomerante hidráulico mais utilizado na construção civil. Paralelo ao exposto, a grande importância atual está no desenvolvimento qualitativo e quantitativo dos produtos de hidratação do cimento Portland com as adições minerais, visto que a maioria destes materiais proporcionam alterações na velocidade de hidratação das matrizes cimentícias (PINHEIRO, 2015).

Nos últimos anos, embora já foram desenvolvidos inúmeros trabalhos voltados ao entendimento da reatividade pozolânica de diversos e novos materiais, a proposição de Morales et al. (2009) ainda continua sendo válida. De fato, novos estudos da reatividade pozolânica por meio das interações cal/pozolana e cimento/pozolana são necessários para garantir o entendimento dos mecanismos de interação dos materiais, tratando-se de um interesse científico e tecnológico dentro do setor da construção civil. Neste contexto, merece destaque a utilização de medidas elétricas nos diversos estudos de monitoramento dos mecanismos de hidratação do cimento Portland e adições minerais (SANISH, NEITHALATH e SANTHANAM, 2013).

A compreensão dos mecanismos de reação existentes entre uma adição mineral e o hidróxido cálcico liberado durante o processo de hidratação do cimento Portland requer a utilização de diferentes técnicas instrumentais. Além disso, a informação indispensável para comprovar a reatividade de uma adição mineral se obtém através dos ensaios mecânicos em pastas, argamassas e concretos (TASHIMA, 2012).

Segundo Velázquez (2002), Tashima (2006) e Martínez-Velandia (2006), o uso de adições minerais em compósitos à base de cimento Portland está associado a uma porcentagem ótima de substituição. Esta porcentagem depende das características da adição mineral estudada, além dos efeitos físicos, químicos e mecânicos gerados pela inclusão da adição.

Associado ao comportamento mecânico de pastas, argamassas e concretos, nos últimos tempos alguns trabalhos têm mostrado um novo estudo para caracterização dos materiais pozolânicos, que consiste na determinação do chamado “Fator  $k$  de Eficácia Cimentante”. Trata-se de um número que caracteriza um material pozolânico e determina a equivalência entre a pozolana e o cimento do ponto de vista cimentante, e sua consequência no desenvolvimento da resistência mecânica do compósito cimentício. Especificamente, o fator  $k$  representa a quantidade de cimento Portland que pode ser substituído por uma parte de adição mineral pozolânica no processo de fabricação do concreto convencional (sem adições minerais), para manter suas características (HO e LEWS, 1985; BIJEN e SELST, 1993; PAYÁ et al., 2002).

Para esta tese, vale considerar que o fator  $k$  da cinza do bagaço da cana-de-açúcar é dado pelo fator que representa o consumo de cimento que pode ser substituído nas misturas de microconcreto e concretos com inclusão de CBC, de modo a obter os mesmos valores de resistência mecânica à compressão.

Merece destaque o fato de que o fator  $k$  de eficácia cimentante já é uma ferramenta prática e de alto reconhecimento através de prescrições normativas. De fato, as normas EHE-08 (espanhola) e BS EN 206:2013 (britânica) estabelecem proporções e procedimentos para a eficácia cimentante de cinzas volantes, sílica ativa e escória granulada de alto forno, que podem ser adicionadas diretamente às misturas de concreto utilizando-se o conceito de “desempenho equivalente”.

Sanjuán, Piñeiro e Rodríguez (2011) e Yeh (2013) salientam que não é possível obter um único valor de fator  $k$  para qualquer adição ou propriedade considerada. Este fato leva a estabelecer valores de eficácia seguros e conservativos através das normas vigentes; além disso, o estabelecimento de um limite superior para os valores de  $k$  permite a sua utilização por qualquer engenheiro e técnico de uma maneira mais segura.

Diante deste cenário, existe o interesse científico, tecnológico e econômico em promover a inserção de novos materiais pozolânicos advindos de resíduos agroindustriais no ramo da construção civil, ao passo que a aplicação dos modelos que traduzam a eficácia cimentante desses materiais poderão evidenciar suas particularidades, principalmente em relação à reatividade pozolânica.

Ao mesmo tempo, o interesse pela inserção dos novos materiais pozolânicos nos processos produtivos do cimento Portland tem crescido. Segundo Sanjuán, Piñeiro e Rodríguez (2011), esta é a opção mais recomendável porque a qualidade de adição é controlada e garantida desde o início, garantindo uma mistura mais otimizada com o clínquer do cimento Portland e, conseqüentemente, aumentando a qualidade do cimento.

Quando se refere à inserção de novos materiais pozolânicos, é importante destacar que o Brasil ainda continua sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e este crescimento tem se intensificado em função do crescente esgotamento das jazidas petrolíferas, aliado às melhorias das condições climáticas nos últimos meses (CONAB, 2017). Da mesma forma, estes fatores continuam proporcionando aos pesquisadores o interesse constante de se avaliar as propriedades pozolânicas da cinza produzida através do bagaço da cana-de-açúcar.

## 1.2 ESTRUTURA DA TESE

A partir da introdução sobre o tema com a importância e justificativas da pesquisa, os temas abordados nesta tese foram organizados da seguinte maneira:

- No **Capítulo II**, são apresentados os objetivos gerais e específicos do projeto proposto.
- O **Capítulo III** apresenta o embasamento teórico por meio da revisão bibliográfica, de tal forma a descrever os fundamentos a respeito do cimento Portland e da CBC como material pozolânico. Estes aspectos culminam com o embasamento teórico da eficácia cimentante de adições minerais.
- No **Capítulo IV**, são mostrados os materiais e equipamentos para montagem do aparato experimental da pesquisa, bem como as metodologias empregadas.
- O **Capítulo V** vem expor os resultados e discussões a partir da caracterização da cinza, de pastas e de argamassas, juntamente com o coeficiente de eficácia cimentante da CBC por meio da produção de microconcretos e concretos. Para isso, este capítulo foi dividido em 6 partes, nas quais discrimina os diferentes estudos realizados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.
- O **Capítulo VI** apresenta uma discussão breve dos resultados obtidos, que condizem com as conclusões gerais do trabalho, e propostas futuras.
- Finalmente, no **Capítulo VII** estão as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

## Capítulo II

---

# Objetivos

### 2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O principal objetivo deste trabalho de doutorado é avaliar a reatividade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) por meio da obtenção do fator  $k$  de eficácia cimentante, utilizando uma metodologia baseada na propriedade mecânica de resistência à compressão.

#### 2.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as condições de queima não controlada do bagaço de cana-de-açúcar, para então correlacionar com as propriedades microestruturais das cinzas produzidas.
- Explorar a potencialidade pozolânica da CBC através de métodos de caracterização, dando ênfase à utilização de medidas elétricas para avaliação dos mecanismos de hidratação em argamassas de cimento Portland e CBC.
- Calcular o fator  $k$  de eficácia cimentante da CBC por meio da produção de microconcretos e concretos, em termos de resistência mecânica à compressão.
- Estudar a influência de diversos parâmetros nas propriedades de resistência mecânica e nos valores de fator  $k$  de eficácia cimentante, destacando a porcentagem de substituição de CBC, relação agregado/cimento, relação água/cimento e tempo de cura em microconcretos e concretos constituídos de pozolana.
- Avaliar um método de obtenção do fator  $k$  que leve em consideração a efetividade da CBC em função da porcentagem de substituição de cimento Portland por pozolana.
- Avaliar um método de obtenção do fator  $k$  baseando-se na razão entre o consumo de cimento substituído e o consumo de CBC adicionado.
- Inferir se o método de determinação do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante da CBC é válido para microconcretos e concretos.

## Capítulo III

---

# Revisão Bibliográfica

### 3.1 CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND

#### 3.1.1 O concreto como material de construção

O concreto é, de maneira geral, um conglomerado de materiais diversos, basicamente o cimento, os agregados e a água, estes com propriedades diversas, que, à medida que se misturam, formam um composto, no estado fresco, capaz de se enrijecer e atuar como componente estrutural nos diversos ramos da engenharia. Segundo Neville (2016), é de extrema relevância que se analise o transporte, lançamento, adensamento e acabamento, no estado fresco do conglomerado. É conveniente citar que a maioria dos concretos, ou quase que em sua totalidade, requisitam a utilização de aditivos, sejam eles plastificantes ou superplastificantes.

Segundo Fusari (2008), o microconcreto significa uma mistura de materiais, entre eles o grout, alguns tipos de argamassas e o concreto elaborado com agregados de pequena dimensão (até 9,5 mm), que pode ser chamado de pedrisco. Os padrões de qualidade para o processo de dosagem e aplicação para estes materiais devem ser os mesmos para os demais concretos. O traço é mais econômico à medida que se aumente a dimensão dos agregados e a variedade da sua granulometria, portanto o microconcreto é utilizado preferencialmente para reparos, peças de pouca espessura, ou peças densamente armadas.

Os microconcretos de alto desempenho são compósitos cuja diferenciação se dá na economia significativa de materiais. São basicamente monocomponentes prontos para utilização, altamente eficazes para áreas de difícil acesso, além de sua estocagem na obra ser facilitada. Em relação às suas propriedades, os microconcretos possuem excelentes resistências iniciais e finais; possuem excelente aderência e baixa permeabilidade; contém matérias-primas selecionadas que garantem um alto desempenho; permitem o uso de técnicas de projeção via seca ou via úmida; além disso, apresentam baixa segregação e exsudação devido ao controle rigoroso da granulometria (CONCRETO, 2015).

#### 3.1.2 O cimento Portland

Um dos compostos fundamentais para o concreto é o cimento Portland. Tal composto é enquadrado dentro da categoria dos cimentos hidráulicos, visto que reagem quimicamente com a água, endurecendo sob a mesma. O nome “cimento Portland”, atribuído originalmente devido à semelhança em cor e qualidade do cimento endurecido com a pedra de Portland (um calcário extraído em Dorset), é utilizado até hoje, em todo o mundo, para descrever o cimento obtido pela queima, à temperatura de clinquerização, de uma mistura íntima de materiais calcários e argilosos ou de outros materiais que contenham sílica, alumina e óxidos de ferro, e pela posterior moagem do clínquer resultante (NEVILLE, 2016).

De acordo com Benhelal et al. (2013), a produção do cimento é considerada um dos processos industriais que mais emitem dióxido de carbono no mundo. Em termos quantitativos, projeta-se uma emissão de aproximadamente 900 kg de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de cimento produzida, e, generalizando as emissões, tem-se um total de 5 a 7% de toda a emissão de dióxido de carbono direcionada à indústria do cimento.

Além disso, o custo de instalação de uma fábrica de cimento é bastante elevado, próximo a 200 dólares por tonelada de cimento produzida por ano (NEVILLE, 2016).

Benhelal et al. (2013) reforçam que, entre os anos 2000 e 2006, a produção de cimento foi incrementada em 54% no mundo todo. Esse fato se justifica pelo notório crescimento da população global a partir do ano de 2006, o que alimenta a demanda crescente pelo concreto, este sendo o principal componente da construção civil. Há uma projeção sólida na qual estabelece que a produção de cimento cresça em aproximadamente de 0,8 a 1,2%, alcançando um total de 3,7 a 4,4 bilhões de toneladas em 2050.

Segundo SNIC (2017), no período janeiro a maio de 2017, as vendas de cimento no mercado interno brasileiro totalizaram 21,6 milhões de toneladas, de acordo com dados preliminares da indústria. Esse montante representa uma queda de 8,9% frente ao mesmo período do ano passado. Em 12 meses, as vendas acumuladas totalizaram 55,3 milhões de toneladas, 10,1% menor do que nos 12 meses anteriores (jun./2015 a maio/ 2016). No mês de maio de 2017, foram vendidas 4,5 milhões de toneladas, queda de 5,5% em relação a maio de 2016.

Na visão do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, as recentes medidas de implantação pelo Governo Federal para estimular a atividade de construção civil têm se intensificado no país, contribuindo para a desaceleração da queda de consumo.

Para que haja uma retomada de crescimento, serão necessárias mais ações, além das medidas já adotadas, e a volta de um ambiente macroeconômico mais favorável (SNIC, 2017).

Isso mostra que as indústrias do cimento têm buscado ações para implementar os processos produtivos do cimento Portland. Acrescentando o fato das notórias emissões na produção desse composto, cada vez mais torna-se necessário pensar em produtos secundários, os quais apresentem propriedades semelhantes ao cimento; o intuito é poder substituí-lo para formar novos compósitos e que apresentem resultados finais similares, principalmente relacionado às propriedades de resistência mecânica.

### 3.1.3 O processo de hidratação do cimento Portland

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são: a cal ( $\text{CaO}$ ), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), uma certa quantidade de magnésia ( $\text{MgO}$ ) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto (PERUZZI, 2002 apud NETTO, 2006). Os compostos principais formados são:

- $\text{C}_3\text{S}$  - conhecido como Silicato Tricálcico ou Alita, é normalmente preponderante, aparecendo como pequenos grãos equidimensionais incolores, compondo entre 60% e 67% do cimento Portland. Tem alta resistência inicial e libera grande quantidade de calor de hidratação.
- $\text{C}_2\text{S}$  – conhecido como Silicato Bicálcico ou Belita apresenta grãos arredondados, geralmente geminados, comparecendo usualmente entre 17% e 25% na composição do cimento Portland. Responsável pela pega lenta até os 28 dias, aumentando consideravelmente após este período. Tem baixo calor de hidratação.
- $\text{C}_3\text{A}$  – conhecido como Aluminato de Cálcio, forma cristais retangulares, aparecendo entre 3% e 8% na composição do cimento Portland. Sua hidratação é extremamente rápida, cristalizando em poucos minutos, contribuindo especialmente para a resistência mecânica ao primeiro dia. Apresenta elevado despreendimento de calor, e não promove aumento da resistência em idades posteriores. Além disso, quando presente em forma cristalina, é o responsável pela rapidez da pega, mas que pode ser controlado com a adição de sulfato de cálcio.
- $\text{C}_4\text{AF}$  – o Ferroaluminato de Cálcio é uma solução sólida, e compõe entre 0,5% e 0,6% do cimento Portland. Sua hidratação é rápida, mas não tão intensa quanto o  $\text{C}_3\text{A}$ , apresentando médio despreendimento de calor, contribuindo muito pouco para a resistência mecânica nas primeiras idades.



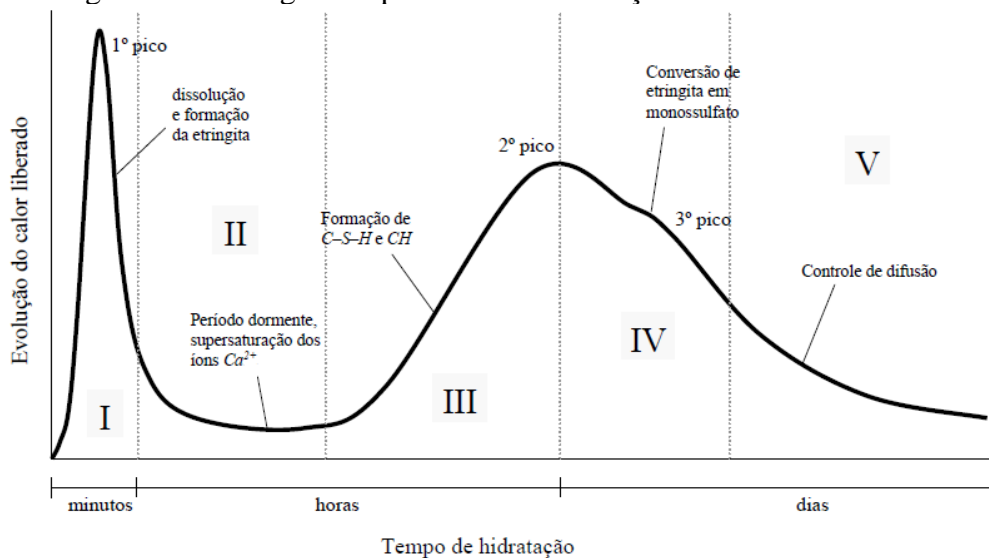
Esses constituintes, após o complexo processo de hidratação, formam, sobretudo, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH) e algumas fases de aluminatos e ferroaluminatos.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a pasta de cimento não possui uma simples microestrutura, mas um conjunto sucessivo de microestruturas com diferentes estágios de desenvolvimento, que, conseqüentemente, causam alterações mecânicas e na estrutura de poros. Além das mudanças microestruturais que ocorrem em função do grau de hidratação, cada fase presente possui características muito peculiares. O C-S-H é a fase em maior quantidade (50 a 60 % do volume) e a que determina as propriedades da pasta. Sua morfologia varia desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares, além de possuir dimensões coloidais e tendência à aglomeração. Os grandes cristais de CH possuem forma hexagonal (20 a 25 % do volume), sua morfologia costuma variar de indefinido a pilhas de grandes placas, e é afetada pela disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema. O sulfoaluminato de cálcio, também chamado de etringita, possui papel secundário nas relações microestrutura-propriedade e compõe 15 a 20 % do volume hidratado; trata-se de um cristal prismático na forma acicular, que depois se transforma em monossulfato hidratado formando cristais de placas hexagonais.

A cinética e o mecanismo da hidratação do cimento são influenciados por fatores como a dissolução de cimento, difusão dos reagentes, nucleação e crescimento dos produtos de hidratação. Além disso, fatores como a composição do cimento, presença de aceleradores ou retardadores da reação e utilização de adições minerais nas misturas também interferem na hidratação (BULLARD et al., 2011).

Dessa forma, a cinética da reação de hidratação do cimento pode ser dividida em cinco partes: (I) Dissolução inicial: primeiras reações do cimento; (II) Indução: reação constante e lenta; (III) Período de aceleração: rápida precipitação do CH e C-S-H; (IV) Período de desaceleração e (V) Período de reação lenta. A curva típica do calor de hidratação do cimento em função do tempo, para condições isotérmicas, é representada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Estágios do processo de hidratação do cimento Portland.



Fonte: Faria (2004).

Segundo Quarcioni (2008), os estágios de hidratação do cimento Portland podem ser definidos em:

- Estágio inicial ou de pré-indução (I): o pico inicial é atribuído a uma combinação exotérmica de molhagem das partículas e de reações iniciais de dissolução de sulfatos alcalinos e liberação de íons  $K^+$ ,  $Na^+$  e  $SO_4^{2-}$ , dissolução do sulfato de cálcio até a saturação, à liberação de íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ . A hidratação do sulfato de cálcio hemihidratado ( $CaSO_4 \cdot 1/2 \cdot H_2O$ ) para dihidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) também contribui para a ocorrência do primeiro pico de liberação de calor. Neste estágio inicia-se a dissolução das fases anidras  $C_3S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$  dando origem a uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que reveste a superfície dos grãos anidros do clínquer. Os íons liberados com a dissolução do  $C_3A$  e do  $C_4AF$  reagem com os íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ , dando origem a um gel amorfo, rico em aluminato, sobre a superfície dos grãos do clínquer e de bastões ou pequenas e espessas agulhas de etringita (fase trissulfoaluminato de cálcio AFt).
- Período de indução (II): uma camada de gel se deposita sobre os grãos anidros de cimento que forma uma espécie de barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. Este gel amorfo e coloidal é originado a partir da precipitação inicial da etringita, e em menor escala, de C-S-H, sendo rico em sílica e alumínio e com presença de íons cálcio e sulfato. Ocorre aumento nas concentrações dos íons  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $OH^-$  em solução. A concentração de íons cálcio na fase aquosa atinge o seu patamar de saturação e inicia-se o declínio. Este período, que também é denominado de dormência, tem

duração aproximada entre 30 minutos e 3 horas, que se finaliza quando a camada de gel depositada sobre os grãos de clínquer é destruída ou se torna mais permeável à difusão iônica. Este período é caracterizado pela baixa taxa de evolução de calor, onde continuam a crescer as concentrações de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$ , mas de forma não linear. Verifica-se um elevado grau de supersaturação quanto ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  até atingir o patamar, quando se inicia a precipitação.

- Período de aceleração (III): predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, com consequente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de C-S-H. Os principais produtos formados são C-S-H e portlandita CH [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]. Inicia-se, portanto, um declínio gradual da concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  na solução e o início da desaceleração na geração de calor do sistema no segundo pico da Figura 3.1. O fenômeno da pega se dá no decorrer do período de aceleração, em que os silicatos, sobretudo a alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ), passam a se hidratar rapidamente até atingir a taxa máxima de hidratação ao final desse período, que corresponde ao máximo de calor liberado. Ocorre também precipitação da etringita. A taxa de hidratação neste período é controlada pela formação do C-S-H.
- Período de desaceleração (IV): tem início com diminuição gradual da taxa da evolução do calor, dado à redução gradual na concentração de íons em solução e em decorrência da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras. Após o período aproximado de 24h, tem-se continuidade das reações lentas que dão origem também a C-S-H e CH. O mecanismo de reação passa a ser controlado por difusão iônica ou por reação topoquímica. Para alguns tipos de cimentos com  $\text{C}_3\text{A}$  maior que 12%, as curvas evidenciam um pico pouco expressivo, e que está associado a uma nova formação de etringita (fase AFt).
- Estágio final (V): Neste estágio, ocorre a formação de placas hexagonais delgadas de monossulfoaluminato de cálcio (fase AFm), a partir de reação do trissulfoaluminato de cálcio (fase AFt) com o  $\text{C}_3\text{A}$  e o  $\text{C}_4\text{AF}$ , em função do consumo completo de sulfato de cálcio no sistema.

### 3.2 ADIÇÕES MINERAIS

Durante o processo de fabricação do cimento Portland, o consumo elevado de energia, aliado à futura exaustão das reservas naturais e à necessidade do reaproveitamento de subprodutos de indústrias, motivou mundialmente este segmento industrial na busca de medidas para adição de materiais no produto cimentício. Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno, de materiais pozolânicos e de fíler calcário.

O uso destes materiais traz melhorias nas propriedades físicas e químicas dos compósitos cimentícios (CORDEIRO et al., 2008), especialmente com relação à durabilidade das estruturas de concreto e redução das emissões específicas de gases do efeito estufa, evitando que as jazidas de calcário sejam exauridas prematuramente (ISAIA, 2011).

#### 3.2.1 Materiais Pozolânicos

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os *materiais pozolânicos* são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza são classificadas como pozolanas, além de certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas (cinzas volantes). Atualmente, tem-se dado atenção às cinzas de resíduos vegetais, como a cinza da casca de arroz (CORDEIRO et al., 2008), cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CORDEIRO e KURTIS, 2017) e cinza da folha da cana-de-açúcar (MORAES et al., 2015).

#### 3.2.2 Reações Pozolânicas

De maneira geral, a atividade pozolânica se refere à reação entre a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e/ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) da pozolana com o hidróxido de cálcio, que é liberado pela hidratação do cimento, em presença de água, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) e/ou silicoaluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H). De acordo com Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), e Alavez-Ramirez et al. (2012), a atividade pozolânica por sua vez depende da área específica da pozolana, dos teores de sílica e alumina reativas, da estrutura cristalina ou desordenada e, principalmente, da sua capacidade de combinar com a cal para formar compostos com propriedades cimentícias.

A utilização de pozolanas em matrizes cimentícias contribui para o desenvolvimento da resistência mecânica como resultado da combinação de efeitos físicos e químicos. De fato, os efeitos químicos estão relacionados com a hidratação dos compostos do cimento Portland e a água, além da reação pozolânica do material com o hidróxido cálcico e a água. Por outro lado, os efeitos mecânicos estão associados aos efeitos de empacotamento ocorrente nas misturas, sendo diretamente dependente do tamanho das partículas da pozolana (SATA et al., 2012, apud RODRIGUES, 2012).

De forma geral, pode-se atribuir a efeitos físicos e químicos as mudanças nas propriedades de produtos cimentícios confeccionados com aditivos minerais. Os efeitos físicos podem ser divididos em três: diluição do cimento Portland, efeito fíler e nucleação (LAWRENCE, CYR e RINGOT, 2003; APONTE, 2010).

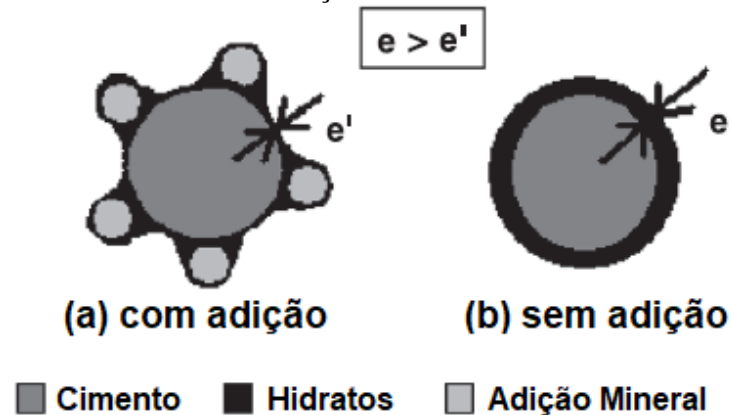
A diluição é um efeito adverso proporcionado pela substituição de uma parcela do cimento pelo aditivo mineral. Este efeito é equivalente ao aumento da relação água-cimento e é inversamente proporcional ao teor de substituição. Naturalmente, menos cimento implica menos produtos formados pelas reações de hidratação.

O efeito da distribuição do tamanho de partícula, que depende da finura e da quantidade de pó mineral utilizado, está relacionado à modificação da porosidade inicial da mistura.

O terceiro efeito físico diz respeito aos mecanismos de nucleação heterogênea promovidos pelos aditivos minerais. Como a atividade cimentícia dos constituintes do clínquer é determinada por reações de superfície (topoquímicas), a área específica efetiva de contato com o meio aquoso desempenha um papel muito importante na cinética das reações químicas. Quando partículas extremamente pequenas são adicionadas ao cimento Portland, alojam-se facilmente nos interstícios dos cristais de clínquer, promovendo aumento da superfície efetiva de contato e, conseqüentemente, aceleram as reações de hidratação dos compostos.

Lawrence, Cyr e Ringot (2003) explanam que o aprimoramento da hidratação do cimento acontece quando a espessura da camada hidratada formada em torno dos grãos de cimento é reduzida à medida que as partículas minerais estão presentes (Figura 3.2). A hidratação da parte anidra, que rapidamente se relaciona com os fenômenos de difusão, é então facilitada. Conseqüentemente, se as partículas da adição mineral forem suficientemente finas, em relação às partículas de cimento, leva-se a um aprimoramento da hidratação do cimento.

Figura 3.2 – Representação esquemática da hipótese que explica o desenvolvimento da hidratação do cimento.



Fonte: Adaptado de Lawrence, Cyr e Ringot (2003).

### 3.3 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

#### 3.3.1 Condutividade e Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica pode ser definida como a resistência elétrica de um condutor de volume unitário e seção transversal constante no qual a corrente é uniforme e continuamente distribuída (ESBACH, 1975, apud SANTOS, 2006), ou seja, é a resistência elétrica à passagem de corrente elétrica obtida entre faces opostas de um volume unitário de material. Da mesma forma, entende-se por condutividade elétrica a facilidade na qual um material é capaz de conduzir corrente elétrica, caracterizando o inverso da resistividade elétrica (CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2012).

Cada material ou elemento específico possui uma propriedade ou característica elétrica que o diferencia dos demais. Isto faz com que a resistividade elétrica seja uma propriedade de grande importância na caracterização dos materiais, pois ela indica a capacidade que o material tem de impedir o fluxo de corrente, independentemente de suas dimensões (GIROTTO, 2002, apud VAILLANT, 2013).

Segundo Hoppe (2005), algumas teorias têm mostrado que os concretos de cimento Portland atua como um sistema em que sua resistividade total depende da resistividade de cada material constituinte, dentre eles agregados, matriz de cimento e a atuação dos dois constituintes ao mesmo tempo.

Os concretos são considerados condutores eletrolíticos, pois se entende que é através do seu sistema de poros conectados que o transporte da corrente elétrica é predominantemente realizado (POLDER, 2001).

Abreu (1998) apresenta a definição de Barrow (1964) para a resistividade elétrica em compósitos cimentícios, mostrando ser uma propriedade que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, sendo também chamada de resistência específica. É também definida como a resistência entre faces opostas de um cubo de determinado material, e igual ao inverso da condutividade.

### **3.3.2 A influência das medidas de condutividade e resistividade em pastas, argamassas e concretos de cimento Portland**

O método da resistividade é utilizado em concretos, principalmente, com o objetivo de detectar a migração de cloretos em direção às armaduras e, assim, poder avaliar o risco de corrosão dessas armaduras (POLDER, 2001). Outra aplicação do método da resistividade elétrica consiste no monitoramento da evolução da hidratação da pasta de cimento, que permite a determinação dos tempos de pega (DOTELLI e MARI, 2001; WEI e LI, 2006).

Neville (2016) menciona que o concreto úmido se comporta essencialmente como um eletrólito com resistividade de até  $100 \Omega\text{m}$ , ou seja, encontra-se no campo dos semicondutores. O concreto seco ao ar possui condutividade da ordem de  $10^4 \Omega\text{m}$ . Por outro lado, o concreto seco em estufa possui resistividade da ordem de  $10^9 \Omega\text{m}$ , o que o classifica como um bom isolante. Além disso, o grande aumento da resistividade do concreto com a remoção de água é interpretado como a corrente elétrica sendo conduzida através do concreto úmido, essencialmente por meios eletrolíticos, ou seja, pelos íons da água evaporável. Entretanto, quando os capilares estão segmentados, ocorre a passagem da corrente elétrica através da água de gel.

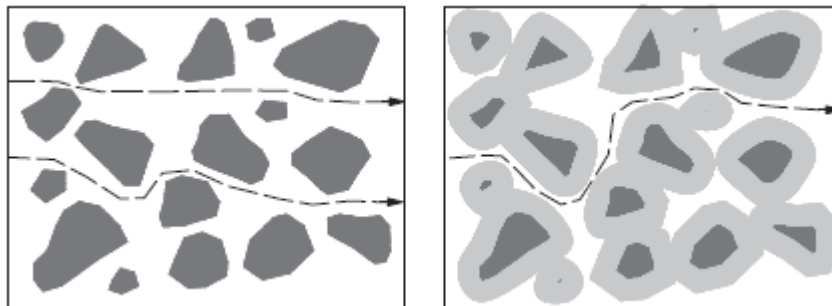
Segundo Hoppe (2005), os principais fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto no estado fresco estão ligados às variáveis como relação água/cimento, tipo e quantidade de agregados, consumo de cimento, tipo de cimento, adições minerais e aditivos químicos. Estes fatores influenciam no tamanho e na distribuição dos poros no concreto endurecido, que por sua vez são diretamente associados à resistência mecânica.

Sabendo que o calor de hidratação é uma propriedade que pode ser influenciada pela inclusão de adições minerais, atualmente tem crescido os estudos que correlacionam estes princípios com as medidas elétricas de compósitos cimentícios. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o calor de hidratação indica o calor ou energia liberada durante a reação química para formação dos produtos de hidratação do cimento que ocorre a partir do contato com a água, a fim de adquirir uma estabilidade do sistema. O calor total e a taxa de liberação de calor de produtos cimentícios com utilização de adições suplementares são reduzidos durante o

endurecimento e, se a reação for lenta, o calor é liberado lentamente; além disso, a cinética de reação pode ajudar na caracterização do desempenho e durabilidade de estruturas, como por exemplo, em estruturas massivas.

De acordo com o modelo esquemático proposto por Wei, Xiao e Li (2012), todos os poros estão conectados e as partículas de cimento são separadas por pasta de cimento no estado fresco. Após um certo tempo de cura, os poros capilares preenchidos inicialmente com água são a principal fase condutora, e os produtos de hidratação formados começam a bloquear o caminho de condução dos poros, aliado ao aumento da tortuosidade. De fato, a diminuição da conectividade e da quantidade de água livre disponível resulta no aumento acentuado na curva de resistividade. Enquanto isso, a porosidade diminui devido ao aumento dos produtos de hidratação, que também favorece o aumento da resistência à compressão. Ou seja, pode-se concluir que a resistividade elétrica e a resistência à compressão apresentam uma tendência de desenvolvimento consistente para as pastas, onde a maior resistividade elétrica de uma mistura evidencia uma maior resistência à compressão.

Figura 3.3 - Esquema dos caminhos de condução em pastas de cimento.



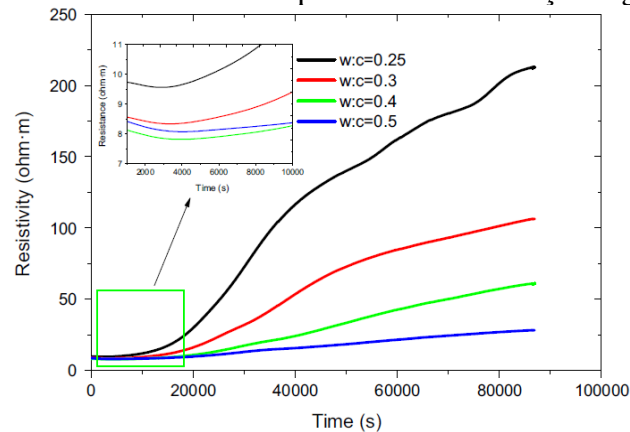
Fonte: Wei, Xiao e Li (2012)

Segundo Dong et al. (2016), os resultados das curvas de resistividade mostram uma redução dos valores nos primeiros minutos de hidratação. Isso evidencia que a misturas apresentam maior concentração de íons  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $OH^-$ . Por outro lado, o aumento abrupto da resistividade ocorre em função da dissolução dos íons, nas quais o consumo de  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $OH^-$  leva à geração dos produtos de hidratação C-S-H e etringita.

Além disso, pode-se observar que a curva de resistividade para pastas de cimento com relação  $a/c = 0,5$  aumenta mais lentamente com o tempo, ao passo que a pasta com relação  $a/c = 0,25$  tem uma tendência oposta; além disso, a resistividade aumenta gradualmente à medida em que a relação água/cimento é reduzida.



Figura 3.4 – Curvas de resistividade elétrica para diferentes relações água/cimento em pastas.



Fonte: Dong et al. (2016).

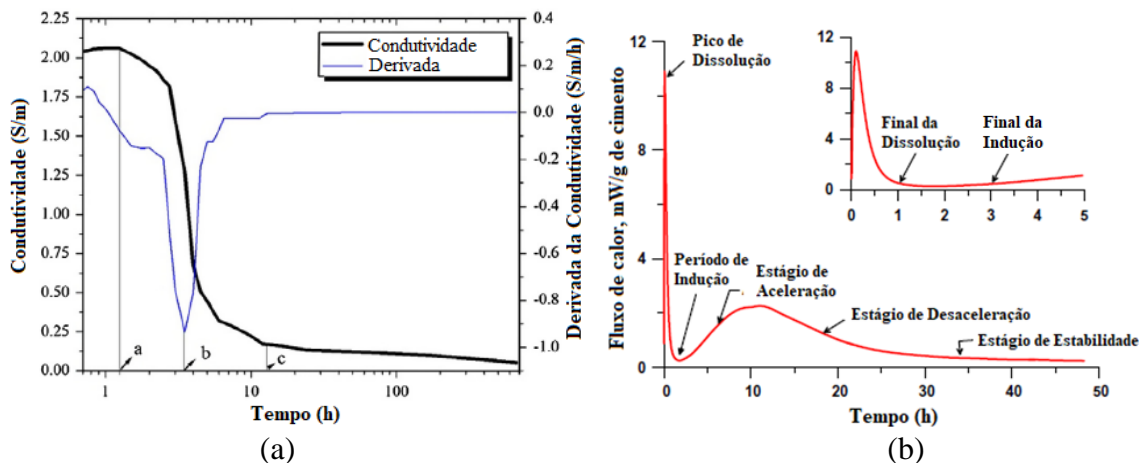
Hoppe (2005) entende que a variação do teor de umidade do concreto é a variável que mais influencia a resistividade elétrica. O pesquisador entende que a diminuição da umidade implica em uma diminuição da quantidade de solução dos poros, ou seja, uma diminuição do eletrólito responsável pela transmissão da corrente elétrica que atravessa o concreto e, conseqüentemente, um aumento na resistividade elétrica do concreto.

A presença de adições minerais, quando corretamente proporcionadas na mistura, é capaz de reduzir significativamente a penetrabilidade e aumentar a resistividade elétrica do concreto, reduzindo a velocidade de corrosão (NEVILLE, 2016).

De modo geral, as reações de longa duração que envolvem a escória granulada de alto forno no concreto causam o aumento contínuo da resistividade elétrica (LUBECK, 2012). Estes valores podem chegar a uma ordem de grandeza, em comparação às misturas controle (NEVILLE, 2016). Da mesma forma, este comportamento também é bastante evidente em cimentos do tipo CP III e CP IV (MEDEIROS-JÚNIOR e LIMA, 2016), em concretos com adição de cinza da casca de arroz (ZAHEDI, RAMEZANIANPOUR e RAMEZANIANPOUR, 2015; GASTALDINI et al., 2009; HOPPE, 2005), concretos com cinza volante (GASTALDINI et al., 2009), concretos com adição de sílica ativa (GU et al., 1993; ABREU, 2008), argamassas com fíler calcário e metacaulim (ALVAREZ et al., 2017), além de concretos e argamassas constituídos de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (BAHURUDEEN et al., 2015; ARENAS-PIEDRAHITA et al., 2016).

Sanish, Neithalath e Santhanam (2013) mostram que os estágios dos mecanismos de hidratação do cimento podem ser correlacionados com a curva de Condutividade X Tempo (Figura 3.5 a) para pastas de cimento Portland. Sendo assim, os períodos identificados na curva de fluxo de calor (Figura 3.5 b) podem ser definidos:

Figura 3.5 - (a) Curva de condutividade e curva derivada correspondente e (b) Curva calorimétrica isotérmica para pastas de Cimento Portland.



Fonte: Adaptado de Sanish, Neithalath e Santhanam (2013).

- Durante a primeira hora de hidratação do cimento Portland, correspondente ao ponto “a” da Figura 3.5 (a), existe o processo de dissolução dos íons  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $OH^-$ , o que faz gerar um leve aumento da condutividade na solução dos poros (MC CARTER, STARS e CHRISP, 2000; WEI e LI, 2005; LUBECK et al., 2012; WEI, XIAO e LI, 2012; ARENAS-PIEDRAHITA et al., 2016; DONG et al., 2016; TSONOS et al., 2009). O máximo da curva corresponde ao final do período de dissolução.
- A partir do período de dissolução, os poros preenchidos com água começam a ser ocupados pelos produtos de hidratação do cimento no intervalo de 1 a 3 horas aproximadamente, nas quais pode ser detectada uma redução gradual dos valores de condutividade. Este período de tempo corresponde ao final do período de indução.
- A partir das 3 h e até 12 h, na terceira zona (até a linha “c” na Figura 3.5 a), a condutividade diminui drasticamente. Isto corresponde ao estágio de aceleração pela resposta calorimétrica, onde existe uma rápida formação de produtos de reação.
- Das 12 h de cura em diante, a redução da condutividade é muito gradual, correspondendo aos estágios de desaceleração e estabilidade do processo de hidratação.

Segundo Cruz et al. (2013), as mudanças dos parâmetros elétricos podem ser usadas para avaliar a evolução das argamassas e esses parâmetros também podem ser vinculados a outras medidas microestruturais. Utilizando cinzas volantes e metacaulim para a produção de argamassas, os autores obtiveram valores de resistividade elétrica a partir da condução iônica através da solução dos poros conectados da porosidade capilar e/ou gel. As argamassas contendo 60% e 35% de cinza volante e metacaulim em relação à massa de cimento, respectivamente, mostraram maiores valores de resistividade ao longo do tempo de cura. O

comportamento foi oposto apenas no primeiro dia para as misturas com metacaulim e na primeira semana para as misturas com cinza volante. Por outro lado, aos 28 de cura, as misturas com cinza volante apresentaram valores de resistividade 2 vezes a mais em relação aos valores obtidos para as misturas controle; para a mistura com metacaulim, este valor foi incrementado em 7 vezes. Entre os 100 e 200 de dias de cura, as misturas com cinza volante tiveram seus valores incrementados em 4 vezes, enquanto que as misturas com metacaulim tiveram aumentos de 2 vezes.

De forma a correlacionar as medidas elétricas com demais trabalhos que apliquem curvas de calorimetria para descrever os mecanismos de hidratação, Rossignolo, Rodrigues e Frias (2017) mostram que a inclusão de cinzas industriais de cana-de-açúcar em pastas de cimento no estado fresco não causa retardos nos períodos de hidratação em relação às pastas de cimento Portland. Entretanto, foi observado incrementos no fluxo de calor pela inclusão de cinzas.

A partir de medidas calorimétricas, Cordeiro e Kurtis (2017) constataram que uso de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com granulometria grosseira ( $D_{50}$  em torno de  $30 \mu\text{m}$ ) apresentam períodos de indução muito similares às pastas de cimento Portland durante as primeiras horas de hidratação. Entretanto, o uso de cinzas mais finas ( $D_{50}$  em torno de  $4,5 \mu\text{m}$ ) evidencia um encurtamento do período de indução em aproximadamente 1 h e um ligeiro aumento da inclinação das curvas calorimétricas durante o período de aceleração.

### 3.3.3 Impedância Elétrica

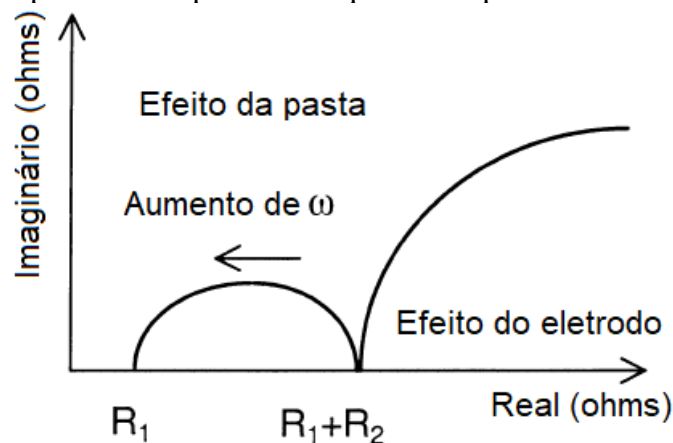
A Espectroscopia de Impedância é uma ferramenta de caracterização elétrica, nas quais a técnica de medida consiste em colocar a amostra de um material sob investigação entre dois eletrodos, para então aplicar um estímulo elétrico e analisar a resposta (CHINAGLIA, 2009).

A utilização desta técnica é de grande valia uma vez que os resultados obtidos podem ser relacionados com as propriedades dielétricas, efeitos de polarização, defeitos, microestrutura e condutividade em sólidos, por meio de termos que envolvem variáveis complexas. Isto é possível através de medidas elétricas em corrente alternada (*ac*) dentro de uma faixa de frequência entre  $10^{-4}$  Hz e  $10^7$  Hz.

Na técnica de Espectroscopia de Impedância, as propriedades elétricas são obtidas a partir de um conjunto de medidas de impedância complexa  $Z^*$ , tomadas em um intervalo de frequências ( $\omega$ ). Os dados experimentais de espectroscopia de impedância podem ser estudados por meio de quatro formalismos complexos: *i*) impedância,  $Z^*$ ; *ii*) admitância,  $Y^*$ ; *iii*) módulo elétrico,  $M^*$ ; e *iv*) permissividade dielétrica,  $\epsilon^*$ .

O gráfico resultante do espectro da impedância elétrica é denominado gráfico Nyquist, representado pelo do plano complexo real e imaginário. Conforme ilustra a Figura 3.6, o espectro descreve a natureza de um semicírculo numa frequência mais alta, com uma pequena parte de um arco numa região de frequência relativamente mais baixa. A impedância real  $Z'$  (resistência elétrica) é posicionada no eixo das abscissas, enquanto que a impedância imaginária  $Z''$  (reatância elétrica) se encontra no eixo das ordenadas.

Figura 3.6 – Espectro de Impedância esquemático para uma corrente alternada.



Fonte: Adaptado de Xu et al. (2000)

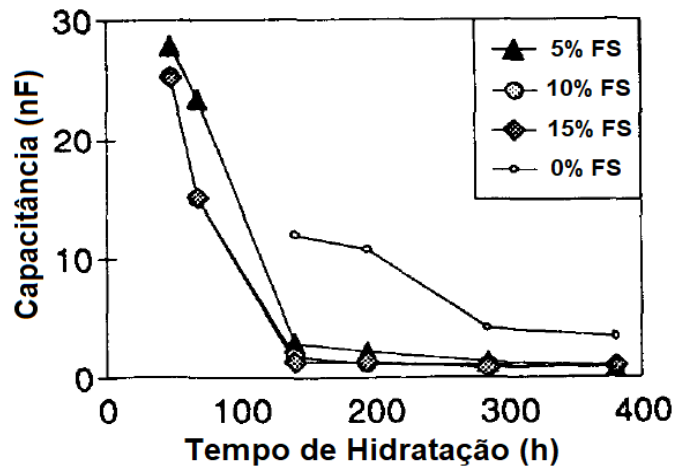
A oposição que um capacitor oferece à passagem da corrente alternada é chamada de reatância capacitiva. Nesse sentido, os valores de capacitância são obtidos por meio de capacitores, que são componentes constituídos basicamente de dois elementos condutores (placas metálicas ou armaduras) e separados por um material isolante (dielétrico).

### 3.3.4 A influência das medidas de impedância elétrica em pastas, argamassas e concretos de cimento Portland

A partir do conjunto de medidas de impedância complexa  $Z^*$ , diversos trabalhos têm utilizado os dados experimentais para traçar os diagramas de Nyquist, permitindo correlacionar as medidas elétricas com os processos de hidratação em pastas, argamassas e concretos de cimento Portland (GU et al., 1993; ANDRADE et al., 1999; DOTELLI e MARI, 2001; CABEZA et al., 2002; MANCHIRYAL e NEITHALATH, 2009; HUSAIN et al., 2017; ORTEGA, SÁNCHEZ e CLIMENT, 2015; SUN et al., 2017 e ZHU et al., 2017).

Gu et al. (1993), ao analisar o comportamento capacitivo de pastas de cimento com adição de sílica ativa, verificaram uma redução brusca dos valores de capacitância nas primeiras 100 horas (Figura 3.7) e estes valores permaneceram sempre menores em relação às pastas referências. Isto é, trata-se de um comportamento bastante coerente quando se trabalha com materiais de alta reatividade pozolânica.

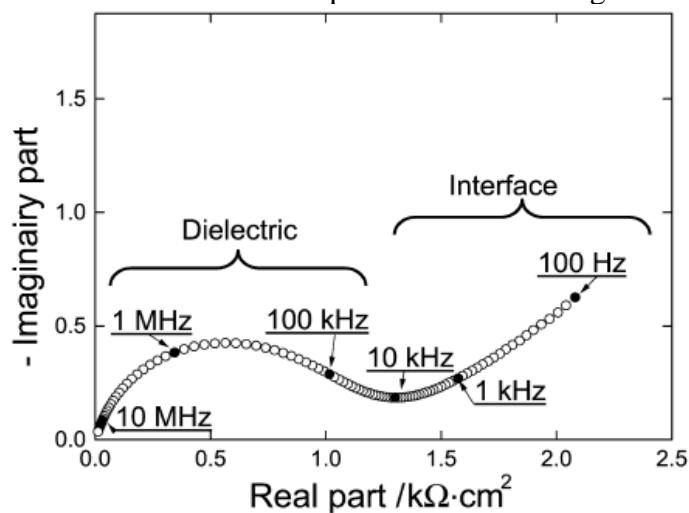
Figura 3.7 – Gráfico de capacitância x tempo de hidratação para pastas de cimento com diversos teores de sílica ativa.



Fonte: Adaptado de Gu et al. (1993).

Segundo Cabeza et al. (2002), o diagrama de impedância típico para pastas de cimento Portland é dado pelo modelo da Figura 3.8. Para eletrodos de contato com as amostras, duas curvas capacitivas são observadas no domínio da frequência delimitada; a curva acima de 100 kHz representa a resposta dielétrica do sistema, enquanto que o comportamento da curva abaixo dessa frequência é devido à contribuição da interface do eletrodo.

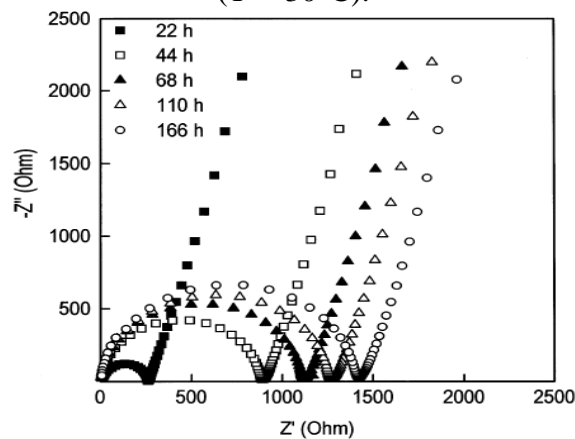
Figura 3.8 – Dados experimentais de impedância elétrica obtido para pastas de cimento a partir do método de contato. Espessura da amostra igual a 0,4 cm.



Fonte: Cabeza et al. (2002).

Além disso, Dotelli e Mari (2001) salientaram que os arcos dos espectros de impedância foram incrementados ao longo do tempo de cura das pastas de cimento Portland (Figura 3.9). Com o aumento da idade de cura, a água livre presente nos poros das argamassas é consumida nas reações de hidratação do cimento, dificultando a passagem da corrente elétrica através da amostra, o que resulta no aumento da resistência elétrica (VENÂNCIO, 2012).

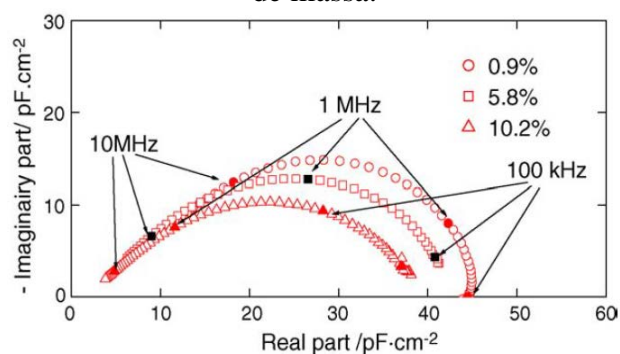
Figura 3.9 – Espectros de impedância de pastas de cimento para diferentes tempos de cura ( $T = 30^{\circ}\text{C}$ ).



Fonte: Dotelli e Mari (2001).

As propriedades dielétricas refletem claramente no desenvolvimento da estrutura porosa e no grau de preenchimento dos poros pelo eletrólito (CABEZA et al., 2006). Conforme a Figura 3.10, para pastas de cimento com a estrutura mais desenvolvida (tempo de cura acima de 28 dias), quando todos os poros estão preenchidos pelo eletrólito, o principal fator característico é a assimetria do arco, observado no espectro de impedância, o que está relacionado com a menor perda de massa. Quando as amostras não apresentam sua estrutura totalmente desenvolvida (tempo de cura menor que 15 dias), a dispersão assimétrica diminui e a dispersão simétrica passa a ser mais relevante, que evidencia as maiores perdas de massa das amostras.

Figura 3.10 – Evolução do espectro de impedância para pastas de cimento em função da perda de massa.

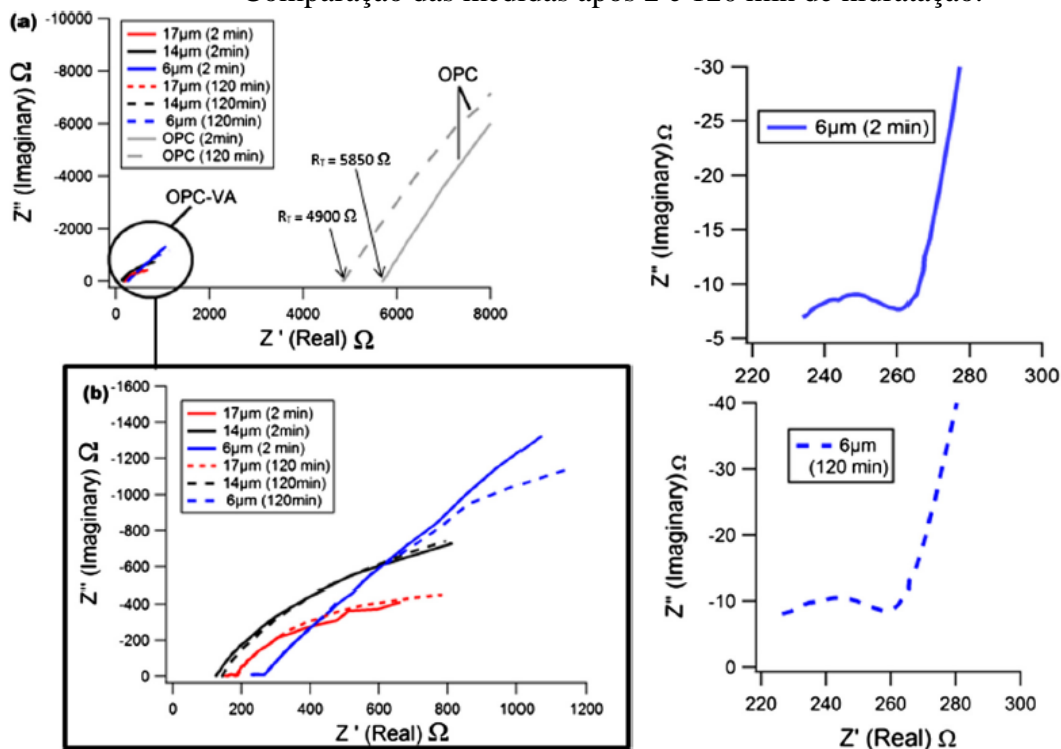


Fonte: Cabeza et al., (2006).

Mais recentemente, Tang, Li e Shao (2014) avaliaram o processo de hidratação de pastas de cimento misturadas com cinzas volantes, escória de alto-forno e sílica ativa, através das medidas de impedância elétrica. Durante a fase de dissolução, observa-se que as reações de dissolução de íons evidenciam a diminuição do módulo de impedância. Entretanto, no estágio de aceleração, alguns dos produtos de hidratação, como o portlandita, são gerados e levam ao aumento significativo do módulo de impedância. Em comparação com os dados da mistura controle, as pastas com maior consumo de cinzas volantes e de escória exibem valores mais baixos de módulo de impedância, levando à percolação mais tardia dos íons. Isso mostra que reação pozolânica da cinza volante e escória não inicia até que certa quantidade de hidróxido de cálcio seja formada nas matrizes de cimento, indicando que a hidratação pode ser retardada com a substituição do cimento pelas pozolanas (LUBECK, 2012). Por outro lado, para as pastas constituídas de sílica ativa, valores mais altos de módulo de impedância são obtidos em relação à pasta controle. Em função da alta finura da pozolana, os efeitos de nucleação heterogênea e rápida percolação dos íons nas matrizes respondem aos altos valores de impedância.

Uma investigação experimental utilizando Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) foi realizada para avaliar a inserção de cinza vulcânica pozolânica natural em pastas de cimento, em termos de substituição do cimento Portland (HUSAIN et al., 2017). Conforme mostra a Figura 3.11, em relação aos gráficos de Nyquist, o aumento da resistência das amostras ao longo do tempo de cura foi atribuído à formação dos produtos de hidratação. Quando se incorpora a cinza vulcânica mais fina (tamanho médio de 6  $\mu\text{m}$ ), o aumento dos valores de resistência elétrica em relação à pasta controle esteve associado ao aumento da reação pozolânica. Percebe-se então que a adição de cinzas levou ao aumento da resistividade das amostras, diminuindo o caminho condutor e que leva à formação de uma rede de poros mais densa na matriz de cimento.

Figura 3.11 – Gráficos de Nyquist para pastas produzidas com 90% de cimento Portland e 10% de cinzas vulcânicas naturais e com diversas granulometrias (17, 14 e 6  $\mu\text{m}$ ). Comparação das medidas após 2 e 120 min de hidratação.



Fonte: Husain et al. (2017).

### 3.4 A CANA-DE-AÇÚCAR

#### 3.4.1 Produção e processamento para obtenção do bagaço

No Brasil, a tradição do cultivo da cana-de-açúcar remonta ao século XVIII. No entanto, foi somente no século XX que o país descobriu que o álcool podia ser uma fonte de energia viável.

Nesse contexto, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017) tem denotado que a agroindústria sucroalcooleira passa por um período de favorecimento devido ao esgotamento das jazidas petrolíferas e ao elevado preço do petróleo.

Atualmente, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade.



O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro (CONAB, 2017). Segundo Bioeletricidade (2016), em sete anos, de 2003 a 2010, o Brasil converteu-se no maior laboratório de desenvolvimento de motores bicomustíveis do planeta, atingindo a marca dos 10 milhões de veículos flex nas ruas, representando 90% das vendas de carros novos e quase metade da frota total. Em 2009, pela primeira vez o consumo de etanol superou o de gasolina. Internacionalmente, as usinas sucroalcooleiras têm entrado em uma nova fase na história do etanol, que deixa de ser uma experiência unicamente brasileira e passa a ser adotado em mais de 30 países.

Conforme dados apresentados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017), a produção de cana-de-açúcar no Brasil está estimada para a safra 2017/18 em 647,6 milhões de toneladas, com uma redução de 1,5% em relação à safra anterior. A área a ser colhida está estimada em 8,84 milhões de hectares, com queda de 2,3%, se comparada com a safra 2016/17. Além disso, a produtividade estimada para a temporada 2017/18 é de 73.273 kg/ha. O leve incremento, observado em relação à safra passada (0,9%), é em decorrência da expectativa de recuperação das lavouras nas regiões norte e nordeste do Brasil (9,1%), e em menor escala nas regiões centro e sul, principal produtora nacional (0,4%). As causas estão relacionadas à melhoria esperada das condições climáticas nos últimos meses.

A extração do caldo da moagem da cana-de-açúcar gera um resíduo sólido: o bagaço. Segundo FAPESP (2017), para cada tonelada de bagaço, são gerados aproximadamente 25 kg de cinza residual.

Bioeletricidade (2016) afirma que este resíduo pode ser transformado em bagaço hidrolisado para ser utilizado como ração para bovinos ou na produção de aglomerados, compensados de madeira, mantas e papéis. Além disso, o bagaço de cana é consumido na cogeração de energia, tornando as usinas autossustentáveis energeticamente. Em alguns casos, a sobra de eletricidade é vendida a companhias elétricas.

O processo de cogeração é um termo designado para identificar os processos de produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso da energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico (MACEDO, 2009).

### 3.4.2 Aplicações da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em matrizes cimentícias

Ao longo do tempo, diversos estudos têm mostrado que as cinzas obtidas a partir da calcinação do bagaço da cana-de-açúcar exibem potencialidade para ser utilizada como material cimentício suplementar. Em função de sua composição química, este material apresenta-se potencialmente como aditivo mineral para pastas, argamassas e concretos (PAYÁ et al., 2002), considerando que as cinzas apresentam uma concentração muito elevada de sílica, além da presença de alumínio, ferro, óxidos alcalinos e alcalino-terrosos em menores quantidades (SOUZA et al., 2011; CORDEIRO, 2006).

Conforme Paula (2006) e Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), a incineração do bagaço de cana-de-açúcar em condições não controladas gera uma cinza que pode conter altos teores de carbono e de matéria orgânica. Fatores como temperatura elevada de queima (CORDEIRO et al., 2009) e combustão incompleta podem afetar o grau de cristalinidade da sílica presente nas cinzas (ALAVEZ-RAMIREZ et al., 2012). Além disso, de acordo com Tashima (2006), a quantidade de carbono e de materiais não queimados tem grande influência no teor de absorção de água (PAYÁ et al., 2002), pois o material carbono é extremamente fino; isso ocasiona um aumento na demanda de água, além de que tais impurezas podem limitar o contato entre o hidróxido de cálcio e a sílica reativa, impedindo a formação dos compostos estáveis (MARTIRENA et al., 1998).

Os estudos sobre as cinzas do bagaço de cana se desenvolveram a partir de 1998, utilizando os ensaios de difração de raios X e termogravimetria para avaliar a evolução do consumo de hidróxido de cálcio e formação dos produtos de C-S-H nas matrizes cimentícias (MARTIRENA et al., 1998). O mesmo efeito foi obtido por Singh et al. (2000), onde os resultados indicaram que grande quantidade de C-S-H foi formado na presença das cinzas e que o teor de 10% de substituição de cimento por CBC apresentou o melhor desempenho mecânico em todas as idades de hidratação.

A pozolanicidade da cinza de bagaço da cana-de-açúcar foi analisada por Payá et al. (2002), que utilizaram cinzas advindas dos fornos das usinas e submetidas ao processo de peneiramento, além de cinzas que passaram pelo processo de calcinação a 600°C durante 1 hora. Apesar do material ter evidenciado altos teores de carbono (acima de 15%) e alta cristalinidade, os autores mostraram que a CBC foi capaz de fixar grande quantidade do hidróxido de cálcio, principalmente devido à presença de sílica e alumina reativa em ambos os sistemas de pastas.

Os três trabalhos citados anteriormente evidenciaram que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar pode ser formada por estruturas amorfas e cristalinas, e que uma quantidade significativa de sílica pode estar presente no material.

Nesse sentido, Paiva (2016) apresenta uma tabela, nas quais identifica cinzas do bagaço de cana de diferentes origens para aplicação em produtos cimentícios. De maneira geral, a tabela mostra que a soma dos óxidos necessários à classificação como material pozolânico ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) variou de 51 a 93% e as perdas ao fogo (PF) de 0,2 a 25%. No que diz respeito às cinzas brasileiras, a média da soma dos óxidos apresentou-se em torno de 84% e a maioria das perdas ao fogo foram inferiores a 6%.

Tabela 3.1 - Percentual de óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e PF nas cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em diversas pesquisas.

Autor	Localidade de coleta	País	$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	Perda ao fogo (%)
Martirena-Hernández <i>et al.</i> (1998)	Vila Clara	Cuba	72,74 / 5,26 / 3,92	0,77
Singh <i>et al.</i> (2000)	Captainganj, Kushinagar	Índia	63,16 / 9,70 / 5,40	6,90
Payá <i>et al.</i> (2002)	Ingenio Providencia	Colômbia	59,87 / 20,6 / 5,76	0,63
Borlini <i>et al.</i> (2006)	Campos de Goytacazes – RJ	Brasil	77,50 / 4,70 / 3,80	0,31
Ganesan <i>et al.</i> (2007)	Aranthangi-TamilNadu	Índia	-	11,2
			64,15 / 9,05 / 5,52	4,90*
Frias e Cocimã (2007)	Placetas, Vilaclara	Cuba	58,61 / 7,32 / 9,45	2,73*
			59,55 / 7,55 / 9,83	0,81*
Cordeiro <i>et al.</i> (2008)	São João da Barra –RJ	Brasil	78,34 / 8,55 / 3,61	0,42
Umamaheswaran e Batra (2008)	-	Índia	65,03 / 0,49 / 0,49	24,84
Cordeiro <i>et al.</i> (2009a)	São João da Barra – RJ	Brasil	60,96 / 0,09 / 0,09	5,7*
Osimubi <i>et al.</i> (2009)	Jimeta, Adamawa	Nigéria	41,17 / 6,98 / 2,75	17,57
Akram <i>et al.</i> (2009)	-	Paquistão	64,44 / 6,74 / 5,77	2,58
			54,45 / 6,06 / 3,23	19,39
Chusilp <i>et al.</i> (2009a)	-	Tailândia	60,67 / 4,30 / 4,02	13,59*
			70,64 / 3,68 / 4,06	9,29*
			77,37 / 3,59 / 4,66	5,08*
Chusilp <i>et al.</i> (2009b)	-	Tailândia	64,88 / 6,40 / 2,63	8,16
Paula <i>et al.</i> (2009)	Urucânia – MG	Brasil	83,71 / - / 6,54	5*
			53,17 / 13,92 / 4,44	20,90
Barroso (2011)	Campos de Goytacazes – RJ	Brasil	69,58 / 15,72 / 5,68	2,09*
			70,92 / 16,09 / 5,79	0,21*
Lima <i>et al.</i> (2011)	São Carlos – SP	Brasil	96,20 / 1,90**	1,04
			66,61 / 9,46 / 10,08	4,27
Frias <i>et al.</i> (2011)	-	Brasil	55,97 / 12,44 / 6,50	17,98
			69,40 / 11,26 / 5,41	1,56*

\* Tratado termicamente em laboratório

\*\* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ )

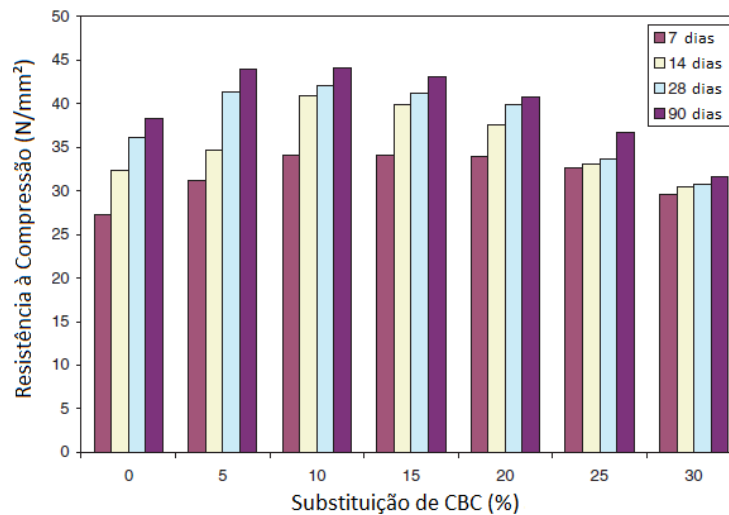
Fonte: Paiva (2016).

Cordeiro (2006) avaliou as porcentagens de substituição de 10%, 15% e 20% de cimento por cinza do bagaço de cana-de-açúcar ( $D_{50} = 2,7 \mu\text{m}$ ), nas idades de 7, 28, 90 e 180 dias, em concretos de resistência convencional ( $f_c28 = 25 \text{ MPa}$ ) e de alto desempenho ( $f_c28 = 60 \text{ MPa}$ ). Com isso, foi observado que os concretos com CBC não apresentaram diferenças significativas na resistência à compressão aos 7 e 28 dias; entretanto, aos 90 e 180 dias, as resistências diminuíram para os teores de 15 e 20% de CBC. Em relação aos concretos de alta resistência, os teores de 15% e 20% reduziram a resistência aos 7 dias de idade, comparado com as misturas controle, entretanto não interferiu de forma significativa nas demais idades. A resistência à tração por compressão diametral das duas classes de concreto não apresentou alteração significativa com os teores de cinza, bem como os valores de módulo de elasticidade.

De acordo com Cordeiro (2006) e Alavez-Ramirez et al. (2012), a redução do tamanho das partículas de cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio de moagem mecânica também tem um significativo efeito sobre a atividade pozolânica, pois o aumento da superfície específica das partículas pode ser traduzido no aumento da reatividade do material.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) produziram concretos a partir de cinzas do bagaço de tamanho médio de  $5,4 \mu\text{m}$ , para teores de substituição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. De acordo com a Figura 3.12, os autores observaram melhorias da resistência mecânica com teores menores que 20% de substituição, o qual foi o limite para conservar a resistência à compressão de concretos, bem como a resistência à tração aos 28 dias de idade. As fases amorfas da CBC utilizada, bem como o teor elevado de óxido de silício, elevada superfície específica e alta reatividade puderam ser fatores que garantiram os incrementos nas resistências à compressão. Além disso, os resultados mostraram que os tempos de início e fim de pega aumentaram com a elevação do teor de cinza do bagaço e que foi necessária maior quantidade de água para adquirir a consistência desejada em pastas de CBC.

Figura 3.12 – Resistência à compressão de concretos com CBC.



Fonte: Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007).

Ao estudar os efeitos das condições de calcinação na microestrutura de pastas com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, Morales et al. (2009) verificaram que as amostras calcinadas a 800°C apresentaram atividade pozolânica bem mais intensa que as amostras calcinadas a 1000°C, visto que a primeira consome uma quantidade bem mais expressiva de cal nas primeiras idades (até o 3º dia). De maneira geral, as amostras apresentaram atividades pozolânicas distintas até os 28 dias de idade, indicando que a temperatura de calcinação pode influenciar no ganho ou perda das propriedades mecânicas de compostos cimentícios.

Frías, Villar e Savastano (2011) expõem três tipologias de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, as quais se diferenciam mediante à temperatura de calcinação considerada:

- Laboratory bagasse ash (LBA), obtida por meio de temperatura controlada com taxa constante de incremento de 10°C/min, sendo o estágio inicial a 400 °C por 20 min, seguido do segundo estágio a 800 °C por 60 min;
- Filter bagasse ash (FBA), proveniente de fornos de combustão, atingindo temperaturas de 300°C;
- Bottom bagasse ash (BBA), atingindo uma temperatura de caldeira de aproximadamente 800°C.

Os autores estabeleceram tamanho das partículas das cinzas abaixo de 90 µm, sendo que, quimicamente, as três amostras foram formadas pelos mesmos óxidos, principalmente sílica e alumina, porém em quantidades diferentes. Entretanto, a cinza BBA mostrou uma porcentagem de 10% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, enquanto que a cinza FBA trouxe uma perda ao fogo de 18% em massa. Em termos mineralógicos, as cinzas foram formadas por quartzo, sendo o principal composto cristalino pela contaminação do resíduo de bagaço pelo solo. Os resultados mostram

que as cinzas provenientes dos fornos não apresentaram propriedades pozolânicas, enquanto que a cinza do tipo FBA trouxe uma atividade pozolânica de média à baixa. As cinzas do bagaço elaboradas sob controle de temperatura em laboratório mostraram excelentes propriedades.

Recentemente, Arenas-Piedrahita et al. (2016) e Arif, Clark e Lake (2016) trazem novamente a aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas de cimento Portland, sugerindo que as melhores propriedades mecânicas são obtidas quando se incrementam baixos teores de CBC nas misturas. Enquanto que as resistências mecânicas à compressão das misturas com CBC foram menores aos 3, 7, 14 e 28 dias, em relação às misturas sem adição, aos 56, 90 e 180 dias as misturas com cinza superaram os valores de resistência das misturas controle, mostrando que as reações pozolânicas proporcionadas pela CBC são mais tardias. O efeito fíler proporcionado pela inclusão de CBC também proporcionou melhorias na durabilidade das argamassas, no que diz respeito à perda de massa por exposição a ácido sulfúrico.

Rossignolo, Rodrigues e Frias (2017) avaliaram os efeitos do uso de cinzas do bagaço e folha de cana-de-açúcar (cinzas industriais) na espessura da zona de transição da interface pasta de cimento/agregado de concretos, por meio da técnica de nanoindentação. Em se tratando de um material de elevada reatividade pozolânica, as análises de nanoindentação indicaram que a espessura da zona de transição da interface pasta de cimento/agregado variou significativamente com a relação água/material cimentante utilizada para o concreto de referência (aproximadamente 25 e 85  $\mu\text{m}$  para a/cm igual a 0,35 e 0,55, respectivamente). Além disso, a inclusão de 20% de cinzas industriais em relação à massa de cimento provoca uma redução significativa de 70% na espessura da zona de transição em relação ao concreto referência; incrementos nos valores de módulo de indentação e dureza também foram constatados.

Cordeiro e Kurtis (2017) avaliaram a cinética de hidratação de pastas constituídas de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar com diversas granulometrias (da ordem de 30  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 7,0  $\mu\text{m}$  e 4,5  $\mu\text{m}$ ). Os dados de calorimetria isotérmica mostram que o tempo de aceleração associado à reação do silicato tricálcico aumenta expressivamente com a diminuição do tamanho de partícula da cinza. Para cinzas com 30  $\mu\text{m}$ , verifica-se que estas se comportam como material inerte (quartzo), ao passo que as partículas com 7,0  $\mu\text{m}$  e 4,5  $\mu\text{m}$  proporcionam alta reatividade. Para a cinza com 4,5  $\mu\text{m}$ , uma ligeira aceleração da hidratação esteve relacionada com o aumento da área superficial específica da pozolana. Além disso, o aumento da área específica BET da adição fez proporcionar maiores valores de fração solúvel de sílica e dos índices de atividade resistente (IAR), aos 7 e 28 dias. Uma relação linear pode ser

assumida entre o IAR e a superfície específica BET, com coeficientes de correlação superiores a 94%.

### **3.5 O FATOR DE EFICÁCIA CIMENTANTE DE POZOLANAS**

#### **3.5.1 Fator $k$ de eficácia cimentante - definições e princípios**

Na atualidade, diversos métodos físicos, químicos e mecânicos têm sido utilizados para caracterizar uma pozolana do ponto de vista de sua atividade pozolânica. Dentre os métodos mecânicos, destacam-se a avaliação geral dos valores de resistência à compressão, índices de atividade resistente ou pozolânica, ganho de resistência e a eficácia cimentante.

É importante destacar que o índice de atividade resistente ou pozolânica está vinculada à reatividade química do material, de modo que o grau de reação química entre a pozolana e o hidróxido cálcico do cimento governam a capacidade das misturas de argamassa e concreto adquirirem resistência mecânica (APONTE, 2010). Entretanto, este índice não fornece uma relação que possa quantificar o consumo de pozolana que atua como cimento, do ponto de vista cimentante e em função do desenvolvimento de resistências mecânicas ao longo do tempo.

Nesse sentido, nos últimos tempos tem-se dado atenção ao modelo para obtenção do Fator de Eficácia Cimentante ( $k$ ) de uma adição mineral. Segundo Papadakis e Tsimas (2002), o fator de eficácia cimentante é definido como a parte de material cimentante ou pozolânico a ser incorporado em concretos ou argamassas pozolânicos, que se considera equivalente ao cimento Portland, tendo este concreto as mesmas ou melhores propriedades que o concreto tradicional ( $k = 1$  para cimento Portland).

O primeiro modelo para a obtenção do fator  $k$  de eficácia cimentante foi desenvolvido por Smith (1967), nas quais propôs a aplicação de uma proporção racional de cinza volante em concretos utilizando o termo “Fator de Eficiência Cimentante da Cinza Volante ( $k$ )”. Este fator foi definido como sendo uma massa  $f$  de cinza volante que deveria ser equivalente à massa  $kf$  de cimento em termos de resistência à compressão. O modelo proposto pelo autor assumiu a forma  $a/cm = a/(c + k.f)$ , onde  $cm$  é a quantidade de material cimentante e  $k$  foi assumido como um único valor para cada cinza volante. Além disso, o fator  $k$  é calculado com base na relação água/cimento do concreto tradicional e a relação água/material cimentante do concreto que contém cinza volante, mostrando que a trabalhabilidade e a resistência à compressão devem ser mantidas.

De acordo com o modelo proposto, Smith (1967) relatou que 20% de cimento deveria ser substituído por 25% de cinzas volantes para obter a mesma resistência. Além disso, o autor verificou que esta proporção depende da dosagem da mistura e das idades de ruptura.

### 3.5.2 Aplicações envolvendo a eficácia cimentante de materiais pozolânicos e hidráulicos

Os conceitos de eficácia cimentante têm sido investigados por diversos pesquisadores, por meio da produção de pastas, argamassas e concretos de cimento Portland constituídos de materiais pozolânicos e hidráulicos. A partir dos inúmeros testes realizados em corpos de prova, as correlações podem ser estabelecidas em função de diversos parâmetros, dentre eles a relação água/cimento, relação água/material cimentante, consumo de cimento, porcentagem de substituição de pozolana e idade de cura das amostras.

Segundo Wong e Razak (2005), a resistência à compressão é normalmente utilizada como base para a estimativa do fator  $k$  porque é um teste industrial simples e consistente e, além disso, pode ser usado efetivamente para avaliar a qualidade geral, durabilidade e desempenho de uma mistura de concreto.

Uma grande parcela dos trabalhos que envolvem o estudo da eficácia cimentante tem feito o uso de modelos de regressão para ajustar os dados de resistência mecânica experimentais aos valores teóricos, destacando-se modelos logarítmicos, potenciais e lineares, além do modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999) (BIJEN e SELST, 1993; PAYÁ et al., 2002; VELÁZQUEZ, 2002; MARTÍNEZ-VELANDIA, 2006; APONTE, 2010; PAYÁ et al., 2013; BHANJA, 2015).

Entretanto, a predição da resistência mecânica em função da relação água/cimento também tem sido feita através das equações de Bolomey e Feret, levando à obtenção de novas expressões e coeficientes quando se incorpora a pozolana no consumo de material cimentício (ONER, AKYUS e YILDIZ, 2005; ABDELKADER, EI-HADJ e KARIM, 2010; YILDIRIM et al. 2011).

Na atualidade, também existem vários trabalhos que define a eficácia de pozolanas por meio de durabilidade, como por exemplo frente à penetração de cloretos (APONTE, BARRA e VÁZQUEZ, 2012; BADOGIANNIS et al., 2015; LOLLINI, REDAELLI e BERTOLINI, 2014) e carbonatação (GRUYAERT, MAES e BELIE, 2013; LOLLINI, REDAELLI e BERTOLINI, 2014). De fato, os trabalhos têm mostrado que tais propriedades podem ser melhoradas em função da inclusão dos materiais pozolânicos.

Uma atenção especial sempre foi voltada para a obtenção de fator de eficácia cimentante da cinza volante, visto que inúmeros trabalhos foram desenvolvidos com o passar do tempo. De fato, Ho e Lewis (1985), Bijen e Selst (1992), Babu e Rao (1993), Gopalan (1995), Papadakis e Tsimas (2002), Oner, Akyus e Yildiz (2005), Valente et al. (2010), Yildirim et al. (2011), Aponte, Barra e Vázquez (2012), Yeh (2013), Lollini, Redaelli e Bertolini (2014), Sinha (2014), Murumi e Gupta (2015) e Bhanja (2015) têm explorado a aplicação da pozolana para avaliar



sua eficácia cimentante em argamassas e concretos de cimento Portland. Para isso, os autores aplicam diferentes metodologias de cálculo e dosagem das misturas, bem como os teores de substituição de cinza volante, relações água/cimento e idades de cura das amostras.

Além disso, demais trabalhos têm mostrado os conceitos para avaliar a eficácia cimentante de sílica ativa (ALAEJOS e FERNÁNDEZ, 1999; PAYÁ et al., 2002; BABU e PRAKASH, 1995; WONG e RAZAK, 2005; PAYÁ et al., 2013), cinza da casca de arroz (PAYÁ et al., 2002) e resíduos de catalisador do craqueamento catalítico (PAYÁ et al., 2013).

A avaliação do fator  $k$  também foi feita para misturas de pastas, argamassas e concretos contendo metacaulim (MK), segundo Payá et al. (2002), Badogiannis et al. (2004) e Wong e Razak (2005). Aplicações voltadas à obtenção do fator de eficácia cimentante da escória de alto-forno são constatadas nos trabalhos de Abdelkader, Ei-Hadj e Karim (2010), Sanjuan, Piñeiro e Rodríguez (2011), Gruyaert, Maes e Belie (2013) e Lollini, Redaelli e Bertolini (2014), enquanto que os últimos autores também avaliaram os efeitos da inserção de fíler calcário em concretos.

A importância de se avaliar a eficácia cimentante dos materiais pozolânicos e hidráulicos tem sido cada vez mais difundida, e este estado de conhecimento também tem sido caracterizado através de instruções normativas. De fato, a norma britânica BS EN 206:2013 – “Concreto – Especificação, desempenho, produção e conformidade”, além da norma espanhola EHE-08 – “Instrução de Concreto Estrutural”, trazem os requerimentos necessários que regem a eficácia cimentante de materiais pozolânicos e hidráulicos comerciais, dentre eles a cinza volante, sílica ativa e escória granulada de alto-forno.

Para a norma BS EN 206:2013 – parágrafo 5.2.5.2, o fator  $k$  de eficácia baseia-se na comparação do desempenho de durabilidade (ou a resistência como critério intermediário para garantir a durabilidade) de um concreto de referência em relação a um concreto com substituição de cimento por adição, levando-se em conta a relação água/cimento e o teor de adição. Da mesma forma, no Artigo nº 37 – “durabilidade do concreto e das armaduras” e parágrafo 37.3.2 da norma EHE-08, é especificado que, quando se utiliza adições na fabricação do concreto, se poderá ter em conta seu emprego aos efeitos de cálculo do consumo de cimento e da relação água/cimento.

A tais efeitos, a relação água/cimento será substituída pela relação  $A/(C + k.F)$ , sendo  $C$  o consumo de cimento,  $F$  o consumo de adição e  $k$  o coeficiente de eficácia cimentante. Desse modo, a Tabela 3.2 mostra o resumo dos índices e limites estipulados pelas normas para cada tipo de adição.

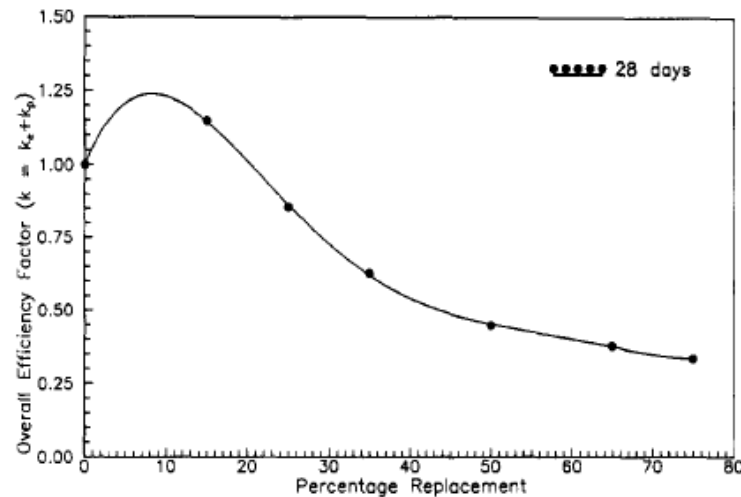
Tabela 3.2 – Valores de fator  $k$  de eficácia cimentante com base nas normas BS EN 206:2013 e EHE-08.

Adição	Fator $k$ de eficácia cimentante	
	BS EN 206:2013	EHE-08
Cinza Volante	$k = 0,4$ (CEM I e CEM II/A) $FA/CEM \leq 33\%$ (massa) para CEM I $FA/CEM \leq 25\%$ (massa) para CEM II/A	$k \leq 0,2$ (CEM I 32,5) $k \leq 0,4$ (CEM I) $k \leq 0,65^*$ $FA/CEM \leq 35\%$ (massa)
Sílica Ativa	CEM I e CEM II/A $a/c \leq 0,45$ $k = 2,0$ $a/c > 0,45$ $k = 2,0$ Exposição classes XC e XF $k = 1,0$ $SF/CEM \leq 11\%$ (massa)	$k \leq 2,0$ $k = 1,0$ ( $a/c > 0,45$ e classe de exposição H ou F) $SF/CEM \leq 10\%$ (massa)
Escória Granulada de Alto-Forno	De acordo com as disposições válidas no local de uso.	-----

\* Esse valor pode ser usado quando os resultados são validados previamente pela ordem certificadora do concreto.  
 Fonte: Elaboração do próprio autor.

Babu e Rao (1993) pesquisaram o fator de eficácia da cinza volante a partir de misturas de concreto, em termos de resistência mecânica à compressão, relação água/cimento, idade de cura e porcentagem de substituição. Os autores propuseram um "fator de eficiência total", que pode ser assumida pela multiplicação de dois fatores separados, denominados "fator de eficiência geral", que é uma constante para todas as porcentagens de substituição, e "fator de eficiência percentual", que varia com o nível de substituição. Nestas condições, verificou-se que o fator de eficiência total pode mudar com a idade, tipo e conteúdo de cimento e pozolana, além das condições de cura e temperatura. A Figura 3.13 mostra o resultado do "fator de eficiência total", concluindo que altos níveis de substituição de cimento por cinza volante levam à redução dos valores de eficácia, e que a relação água/cimento não tem influência nesse processo.

Figura 3.13 – Variação da “eficiência total” pela substituição de cinza volante.



Fonte: Babu e Rao (1993).

Papadakis, Antiohos e Tsimas (2002) propuseram um método para avaliar o fator de eficácia de várias pozolanas naturais e artificiais, utilizando o conceito de índice de atividade pozolânica, pela razão entre a resistência à compressão entre a mistura com adição e a mistura tradicional. O conceito proposto permitiu uma boa correlação entre os dados experimentais e teóricos para as pozolanas artificiais (no caso utilizou-se sílica ativa), enquanto que para o caso de pozolanas naturais, o fator  $k$  foi superestimado.

Nos diversos estudos de Papadakis, Antiohos e Tsimas (2002), a incorporação de cinzas volantes de classe F proporcionaram coeficientes de eficácia entre 0,8 e 1,2, ao passo que cinzas volantes de classe C evidenciaram índices de 0,8 a 0,9, entre os 7 e 90 dias de cura, com tendência de aumento de eficácia ao longo do tempo. Por outro lado, as pozolanas naturais apresentaram eficácia mais baixa, da ordem de 0,2 a 0,4, permanecendo quase que constante ao longo do tempo de cura.

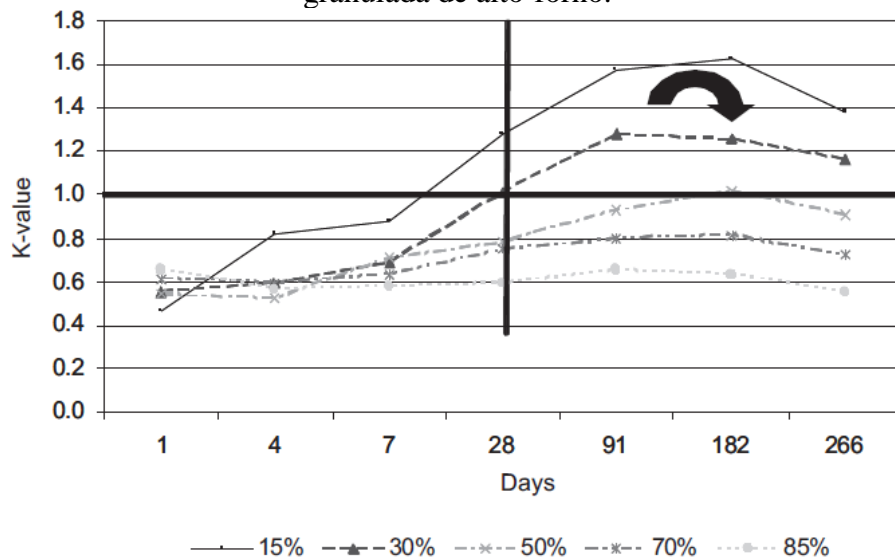
Aponte (2010), ao analisar a eficácia da cinza volante em concretos, verificou que os valores de  $k$  não superaram a unidade para cinzas de classe F e C, independente do tempo de cura (7, 28 e 90 dias) e relação água/cimento (0,4 – 0,525 – 0,65). Yildirim et al. (2011) também mostram que os valores de  $k$  estão compreendidos entre 0,45 e 0,75, para cinzas volantes de classe F e C, substituindo-se 10% e 17% de cimento Portland por cinza.

Por outro lado, Aponte, Barra e Vázquez (2012) verificaram um incremento substancial nos valores de eficácia cimentante da cinza volante em termos de difusão de cloretos em concretos. Coeficientes de eficácia de até 2,5 foram obtidos para cinzas volantes de classe F e para relações água/cimento baixas. Além disso, os autores concluíram que o comportamento da eficácia cimentante da cinza volante tem relação com sua distribuição do tamanho de partículas,

conteúdo de cal e fases vítreas, tipo de cimento, relação água/cimento, tempo de hidratação e porcentagem de substituição de pozolana.

O desenvolvimento da eficácia cimentante em concretos com adição de escória granulada de alto-forno foi avaliado por Sanjuán, Piñeiro e Rodríguez (2011). Conforme mostrado na Figura 3.14, é visto que os valores de  $k$  diminuem significativamente quando o conteúdo de adição aumenta. Segundo os autores, este fato é lógico porque o cimento atua como um ativador. Em primeiro lugar, os silicatos de cálcio do clínquer reagem com a água durante o processo de hidratação, liberando hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  e, em segundo lugar, os íons alcalinos do clínquer vão para a solução dos poros dos concretos. Sendo assim, o hidróxido de cálcio está envolvido nas reações pozolânicas, além de que os álcalis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) promovem a ativação alcalina parcial da escória.

Figura 3.14 – Evolução do fator  $k$  ao longo do tempo e em relação ao consumo de escória granulada de alto-forno.

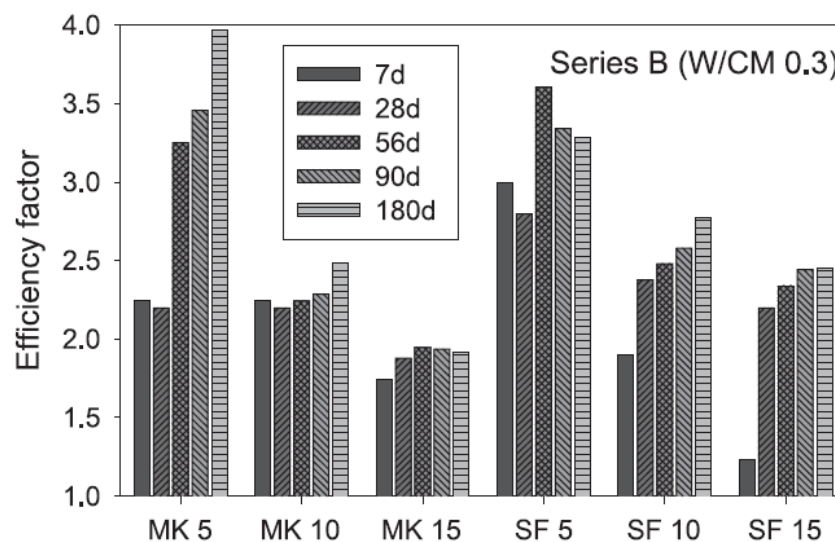


Fonte: Sanjuán, Piñeiro e Rodríguez (2011).

Como pode ser observado, aos 28 dias de cura, apenas os baixos conteúdos de escória granulada de alto-forno (15% e 30%) fornecem valores de  $k$  acima de 0,8 (1,28 e 1,01, respectivamente). Para todos os casos, os valores de  $k$  aumentam com o tempo em até 3 a 6 meses de cura; em seguida, a eficácia diminui, atingindo novamente valores similares aos obtidos aos 28 dias ou mesmo inferiores, quando se refere aos teores de substituição de 70% e 85% de cimento por escória.

Wong e Razak (2005) utilizaram o princípio fundamental da teoria de Abrams para avaliar a eficácia cimentante da sílica ativa e metacaulim pela produção de concretos, e em termos de resistência à compressão e consumos de cimento e pozolana. O método de dosagem proposto no estudo levou em consideração as alterações no consumo de agregado miúdo, ao mesmo tempo em que o consumo de cimento foi reduzido e consumo de pozolana incrementado. As misturas foram elaboradas para relações água/material cimentante igual a 0,27, 0,30 e 0,33, para 5%, 10% e 15% de substituição de cimento Portland por pozolana. Em relação à Figura 3.15, observa-se a contribuição das pozolanas no processo de hidratação dos concretos; entretanto, maiores porcentagens de sílica ativa e metacaulim levaram à redução dos valores de  $k$ . Com base nos resultados obtidos, é evidente que não existe um único valor de  $k$  para a sílica ativa e metacaulim, mesmo para uma relação cimento/pozolana específica. Sendo assim, a eficiência de um pozolana depende da proporção da mistura e da idade dos testes. No entanto, a variação na relação a/cm não parece ter muito efeito sobre os fatores de eficiência, devido à pequena faixa de relações a/cm investigadas no presente estudo.

Figura 3.15 – Fator de eficácia do metacaulim (MK) e sílica ativa (SF).



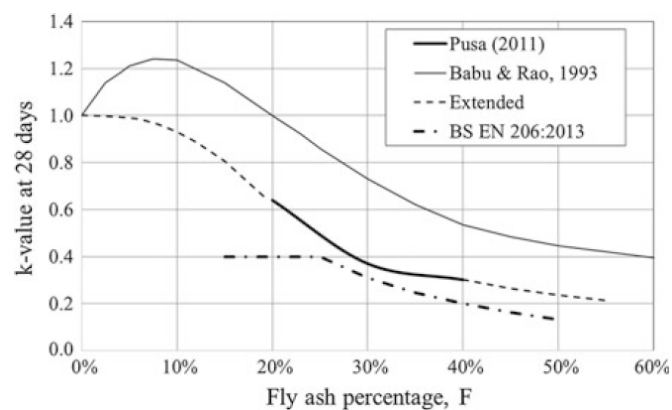
Fonte: Wong e Razak (2005).

Ao mesmo tempo, Badogiannis et al. (2004) obtiveram valores de eficácia próximos a 1,0 para concretos constituídos de metacaulim aos 2 dias de cura, ao passo que aos 28 dias os valores de  $k$  chegaram a 3,0. Por outro lado, observou-se uma queda da eficácia aos 90 dias de cura, chegando a valores da ordem de 2,5.

Recentemente, Murumi e Gupta (2015) propuseram um modelo de previsão da resistência mecânica de concretos constituídos de cinza volante. O fator de eficácia foi baseado em termos de resistência à compressão aos 28 dias de cura, sendo igual a 0,54 para 25% de cinza volante e 0,35 para 45% de cinza. Os resultados mostraram que o fator de eficácia proposto foi aplicável à gama de resistências à compressão obtidas e teores de cinza volante aplicados, nas quais as curvas de resistência mecânica em função da relação água/material cimentante foram ajustadas através do modelo potencial.

A norma BS EN 206:2013 especifica o fator de eficácia  $k$  em 0,4, para cinzas volantes, considerando um teor máximo de 25% de cinza em relação à massa de cimento. Por meio da Figura 3.16, Murumi e Gupta (2015) propuseram um recálculo do fator de eficácia para o uso de cinzas volantes superior a 25% de substituição e, ajustando o consumo de cinzas, um gráfico decrescente foi obtido. A comparação destes mostra que essa relação seria conservadora e, portanto, proporcionaria maior resistência mecânica.

Figura 3.16 – Comparação dos valores de eficácia cimentante.



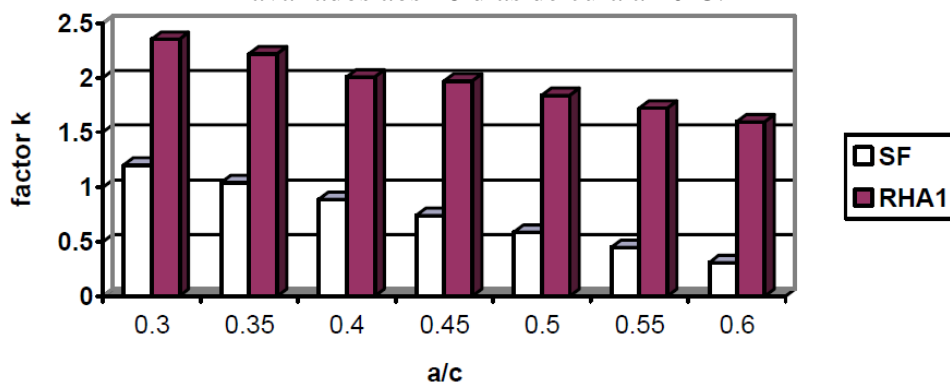
Fonte: Murumi e Gupta (2015).

Payá et al. (2013) estudaram a eficácia do resíduo de catalisador de craqueamento catalítico, sendo este um resíduo gerado a partir da indústria do petróleo, especificamente durante o processo de craqueamento catalítico fluido. Para isso, foram substituídos 15% de cimento Portland por resíduos na produção de argamassas, que foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão aos 3, 7, 14, 28, 90 e 365 dias de cura. Os valores de eficácia do material estiveram compreendidos entre 1,47 e 3,79, o que significa que o cimento Portland poderia ser substituído por um menor consumo de pozolana para que as propriedades mecânicas e relação água/cimento fossem mantidas. A máxima atividade pozolânica foi identificada aos 14 dias de idade, sendo observada a tendência de redução dos valores de eficácia com o aumento da relação água/cimento.

Em comparação com o resíduo de catalisador de craqueamento catalítico, foram obtidos valores de eficácia da sílica ativa, nas quais foi evidenciado valores muito baixos de eficácia (de -1,03 a 0,89), em função do grau de densificação da pozolana e altas dosagens de aditivo superplastificante nas misturas de argamassa. Neste sentido, os valores negativos não têm significado físico, que pode ser interpretado como uma adição inerte.

Payá et al. (2002) também exploraram o comportamento da eficácia cimentante da cinza da casca de arroz (RHA 1). Conforme a Figura 3.17, se pode observar que a eficácia cimentante depende de forma significativa da relação água/cimento, sendo obtidos menores valores de  $k$  para maiores relações água/cimento; isto sugere que a efetividade dos produtos de hidratação vai sendo reduzida à medida que a porosidade da pasta de cimento aumenta como consequência do maior consumo de água. De outro modo, se observa que a cinza da casca de arroz é um material pozolanicamente mais reativo que a sílica ativa, apesar de seu conteúdo menor de sílicio; este comportamento pode estar relacionado com a textura mais irregular das partículas de RHA, aliado à sua maior superfície específica.

Figura 3.17 – Valores de fator  $k$  para sílica ativa (SF) e cinza da casca de arroz (RHA 1) avaliados aos 28 dias de cura a 20°C.



Fonte: Payá et al. (2002).

Por outro lado, no estado da sílica ativa densificada e sonicada, Martínez-Velandia (2006) obteve resultados de eficácia cimentante compreendidos entre 1,68 e 3,42, utilizando um ajuste logarítmico das curvas de resistência à compressão em função da relação água/cimento. Foram inseridos 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento para produção de argamassas. Enquanto que, para os 7 e 28 dias, os valores de eficácia foram incrementados com a redução do fator água/cimento, este comportamento foi oposto aos 90 dias de cura.

## Capítulo IV

# Metodologia Experimental

O Capítulo IV desta tese descreve o programa experimental para a caracterização dos materiais utilizados, bem como os processos de produção dos compósitos constituídos de CBC. Para os estudos de caracterização, contou-se com a colaboração do Grupo de Investigação em Química dos Materiais de Construção (GIQUIMA) - Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) - Universidad Politécnica de Valencia – UPV.

### 4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CP V – ARI. Trata-se de um cimento com mais de 95% de clínquer na composição, sem adição de pozolana, para que não haja interferência na atividade pozolânica da CBC.

Para sua caracterização, foram determinados os valores de massa específica absoluta e massa específica aparente, iguais à 3,14 e 1,02 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, conforme especificações da NBR 5733 (ABNT, 1991).

#### 4.1.2 Cal Hidratada

A cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) de alta pureza (> 95% de hidróxido de cálcio) foi utilizada para a produção de pastas com CBC, de forma a avaliar a reatividade pozolânica. Além disso, para a confecção de argamassas de cal/CBC, se utilizou o aglomerante do tipo CH-III.

#### 4.1.3 Agregados

O agregado miúdo utilizado na produção de argamassas, microconcretos e concretos foi classificado como areia média natural, de origem silícea. Este material passou pelo processo de peneiramento, descartando o material passante na peneira de 2,36 mm (nomenclatura ABNT #8). Além disso, para as misturas de microconcreto, utilizou-se o pó de pedra, de origem basáltica.



O agregado graúdo utilizado na produção de microconcretos foi classificado como brita 0, de origem basáltica. Além disso, utilizou-se a brita 1 de origem basáltica para a confecção dos corpos de prova de concreto.

Os materiais mencionados passaram pelos ensaios de caracterização conforme a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), sendo suas propriedades definidas na Tabela 4.1:

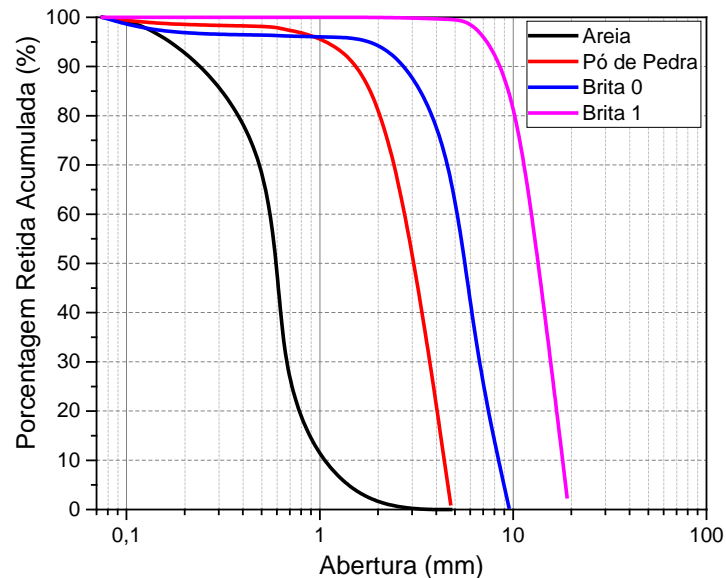
Tabela 4.1 – Propriedades físicas dos agregados.

Propriedade	Areia Média	Pó de Pedra	Brita 0	Brita 1
Diâmetro máximo (mm)	2,36	4,75	9,5	19,0
Módulo de finura	2,12	4,75	5,57	6,91
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,58	4,06	3,00	3,00
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	3,71	2,83	2,89
Massa específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	3,80	2,89	2,93
Absorção (%)	0,34	2,88	1,97	1,22

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além disso, a distribuição granulométrica dos agregados é apresentada na Figura 4.1 abaixo.

Figura 4.1 – Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 4.1.4 Água de amassamento

A água de amassamento foi obtida do abastecimento público de Ilha Solteira-SP.

#### 4.1.5 Aditivo Químico

Foi utilizado aditivo químico superplastificante à base de policarboxilato, de forma a analisar os efeitos da redução da relação água/cimento nas misturas de microconcretos e concretos com adição de CBC e o consequente aumento de resistências mecânicas.

#### **4.1.6 Bagaço da cana-de-açúcar**

O bagaço da cana-de-açúcar foi fornecido pela Usina Vale do Paraná S/A – Álcool e Açúcar. O material foi estocado na fazenda experimental da Faculdade de Engenharia, UNESP-Campus de Ilha Solteira.

#### **4.1.7 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi obtida por meio da queima do bagaço em incineradores de autocombustão pertencentes ao grupo “Materiais Alternativos de Construção (MAC)”, na fazenda experimental da Faculdade de Engenharia, UNESP.

Após o processo de queima, realizou-se a cominuição da cinza produzida por meio de um peneirador granulométrico de agregados graúdos e moinho de bolas.

#### **4.1.8 Quartzo Triturado**

O efeito pozolânico da CBC também foi avaliado por meio da comparação das propriedades mecânicas em microconcretos com adição de um material inerte. Para isso, escolheu-se o quartzo triturado, nas quais sua redução do tamanho de partículas foi realizada através do moinho de bolas.

#### **4.1.9 Capacitores**

Para a produção dos capacitores no interior dos corpos de prova de argamassa, utilizou-se como eletrodo uma tela metálica em aço galvanizado, com diâmetro dos fios igual a 0,3 mm, sendo a malha conectada a fios de cobre por meio de solda de estanho.

### **4.2 EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

#### **4.2.1 Produção da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBC)**

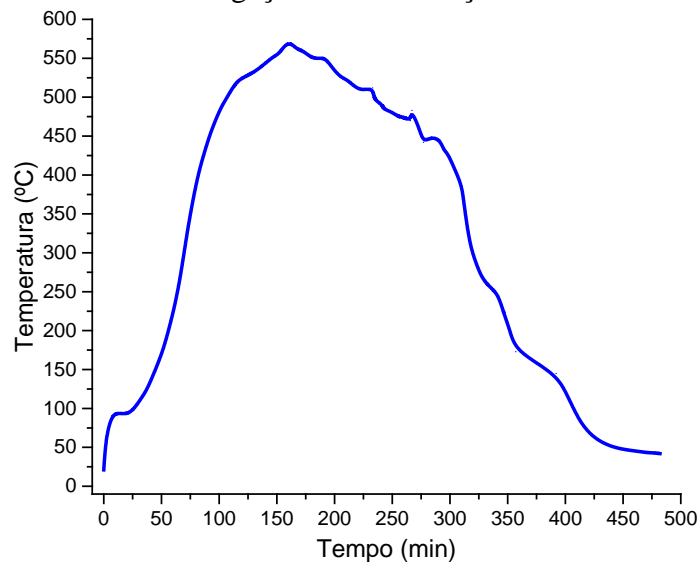
O processo de produção da cinza foi iniciado com a secagem do bagaço durante 24 horas de exposição do material a céu aberto.

Em seguida, o material foi acondicionado em fornos, nas quais o modelo proposto foi desenvolvido por Tashima (2006). Trata-se de um processo de autocombustão, sem controle de temperatura, nas quais os fornos são fechados com uma tampa metálica e mantidos durante um

período de 24 horas. A produção média de cinza é de 0,85 kg a partir de uma massa aproximada de 30,0 kg de bagaço, conduzindo a uma eficiência média de 2,8 % em relação ao valor de matéria-prima acondicionada nos fornos.

Para avaliar o tempo e temperatura de calcinação da CBC, foram introduzidos termopares no entorno do bagaço durante o processo de queima. A Figura 4.2 mostra a evolução da temperatura em função do tempo de autocombustão.

Figura 4.2 – Evolução da temperatura de queima em função do tempo de autocombustão do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A curva mostra que a queima do bagaço teve uma duração média de 450 minutos, correspondente a aproximadamente 7,5 horas. Além disso, a temperatura de pico foi registrada em 570 °C, correspondente a 162 minutos de ensaio (2,7 h). Após este período, observa-se que a temperatura é gradualmente reduzida até os 300 minutos, quando se percebe que a taxa de resfriamento é mais elevada após este tempo e até a finalização do processo.

Tashima (2006) verificou que a cinza da casca de arroz atinge uma temperatura de pico de 850 °C, ao passo que Moraes et al. (2015) verificaram que a queima completa da folha da cana-de-açúcar se dá em aproximadamente 6 horas, com temperatura de pico chegando a 700 °C.

Após a etapa de combustão, a cinza passou pelo processo de peneiramento em agitador eletromecânico, a fim de reduzir as impurezas do material. Para isso, utilizou-se uma peneira de abertura 0,3 mm (nomenclatura ABNT #50).

O processo de cominuição da cinza foi concluído através da moagem do material em um moinho de bolas, sendo este composto por 684 cilindros de aço cujo peso total está em torno de 52,5 kg. Sendo assim, foi acondicionado 5 kg de material no interior do equipamento para o tempo de ensaio fixado em 50 minutos.

#### 4.2.2 Produção do Quartzo Triturado

A fim de comparar a reatividade da CBC com um material inerte (denominado Quartzo Triturado), selecionou-se o material não reativo oriundo da areia fina natural. Para isso, foram acondicionados 5 kg de material no interior do moinho de bolas, para o processo de redução de partículas durante 50 minutos.

O material coletado foi então conduzido ao processo de peneiramento, utilizando-se a peneira de abertura 0,075 mm (nomenclatura ABNT #200). Sendo assim, o material passante na peneira #200 foi utilizado como quartzo triturado.

#### 4.2.3 Técnicas para caracterização da CBC

Para a avaliação do caráter reativo da CBC, foram utilizadas técnicas de caracterização, que evidenciam melhor as propriedades microestruturais do material. Deste modo, foram utilizadas as técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Granulometria por Difração à Laser (ADL), Superfície Específica Blaine e Massa Específica, Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

##### 4.2.3.1 Fluorescência de Raios X (FRX) e Perda ao Fogo

A Fluorescência de Raios-X (FRX) foi utilizada para determinar a composição química da CBC, identificando a porcentagem de cada óxido presente no material. O modelo do equipamento utilizado foi XRF Philips Magix Pro.

O ensaio de perda ao fogo foi feito conforme especificação da norma NBR NM 18 (ABNT, 2012). Esse consiste, basicamente, na queima da amostra em forno mufla à temperatura de  $950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ , com taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e tempo de residência de 15 min. O valor de perda ao fogo é obtido pela Equação 4.1:

$$PF = \frac{m_{110} - m_{950}}{m_{110}} \quad (4.1)$$

Onde:

PF: perda ao fogo;

$m_{110}$ : massa da amostra seca em estufa a  $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ;

$m_{950}$ : massa da amostra calcinada a  $950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.2.3.2 Difração de Raios X (DRX)**

O Difratorômetro de Raio-X (DRX) foi utilizado para determinar a mineralogia da CBC. Os difratogramas foram obtidos por meio do difratômetro da *Shimadzu* modelo XDR-6000, usando radiação em Cu-K $\alpha$  de comprimento de onda igual a 1,5418 Å.

Os dados foram obtidos à temperatura ambiente, com um intervalo de  $2\theta$  de 5 a  $60^{\circ}$  e passo de  $0,02^{\circ}$ .

#### **4.2.3.3 Granulometria por Difração à Laser (ADL)**

A técnica de granulometria por difração à laser é o que fundamentou o comportamento da distribuição do tamanho de partículas da CBC. Para isso, utilizou-se o equipamento Mastersizer 2000 da Malvern Instruments, nas quais permite a medição de partículas entre  $0,02\ \mu\text{m}$  e  $2000\ \mu\text{m}$ .

#### **4.2.3.4 Superfície Específica Blaine e Massa Específica**

Para determinar a massa específica absoluta da CBC, foram observadas as recomendações da norma NBR 16605 (ABNT, 2017), sendo que foram utilizados frascos do tipo Le Chatelier para o ensaio.

A superfície específica da CBC foi determinada pelo equipamento Blaine, conforme prescrições da norma NBR 16372 (ABNT, 2015).

#### **4.2.3.5 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)**

O FTIR foi utilizado para analisar os materiais encontrados na CBC e determinar os materiais formados na hidratação do cimento com pozolana e na reação pozolânica com cal e CBC.

Os espectros de FTIR foram obtidos em função de transmitância, utilizando um espectrofotômetro Nexus 670 da *Nicolet Instrument Corporation*. As análises de espectroscopia das amostras foram realizadas por meio de pastilhas produzidas com o material aglomerante e KBr, na proporção 1:200, respectivamente, para frequências compreendidas entre  $4000\ \text{cm}^{-1}$  e  $400\ \text{cm}^{-1}$ .

#### **4.2.3.6 Análise Termogravimétrica**

A Análise Termogravimétrica é outra técnica para analisar os materiais formados nas reações a partir de pastas cimento/pozolana e cal/pozolana.

O equipamento utilizado neste trabalho foi o módulo TGA 850 Mettler-Toledo, que permite medir simultaneamente a curva termogravimétrica TG e a derivada termogravimétrica DTG. Os ensaios foram realizados com uma atmosfera inerte de nitrogênio, para o fluxo de 75 ml/min. e uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min., sendo que o intervalo de temperatura do ensaio foi entre 35°C e 600°C. Para isso, foram utilizados crisoles de alumínio.

#### **4.2.3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

O uso da microscopia eletrônica tem como objetivo analisar a morfologia da CBC, além de ser utilizada para investigar a evolução das reações de hidratação e o desenvolvimento da microestrutura das pastas, argamassas e microconcretos.

Para isso, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura – MEV, da marca Zeiss, modelo EVO LS15, operando com voltagem de 5,00 kV a 10,00 kV. Sobre as amostras foi depositada uma fina camada de ouro usando um Sputter Coater.

#### **4.2.4 Produção e caracterização de Pastas de Cal/CBC e Cimento/CBC**

Para as técnicas de Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), é necessária a preparação das pastas de cal/CBC e cimento/CBC, para realização dos ensaios aos 7, 28 e 90 dias de cura.

A fim de interromper os processos de hidratação das pastas até as idades de ensaio agendadas, as amostras foram submergidas em acetona.

Além disso, para os ensaios de MEV, foram utilizados pequenos fragmentos de pastas, que, após imersão em acetona, foram levados em estufa a 60 °C por 30 minutos. Para os ensaios de FTIR e DRX as amostras foram trituradas, seguido do processo de filtração e secagem em estufa a 60 °C por 30 minutos. Por fim, o material a ser utilizado resultou da passagem da amostra seca pela peneira de abertura 0,075mm (nomenclatura ABNT #200).

#### **4.2.5 Produção e ensaios aplicados às argamassas de cal/CBC e cimento/CBC**

Inicialmente, foram produzidas argamassas de cal/CBC para avaliação da reatividade da pozolana por meio da norma ASTM C593 - 95 (2000). Além disso, argamassas de

cimento/CBC foram elaboradas para avaliação das medidas de condutividade/resistividade elétrica e impedância elétrica.

#### **4.2.5.1 Mistura**

O processo de moldagem dos corpos de prova se deu através da norma NBR 7215 (ABNT, 1997), utilizando-se uma argamassadeira. Para as argamassas de cal/CBC e cimento/CBC, o tempo de mistura foi definido do seguinte modo:

- Água e cimento/pozolana homogeneizados durante 30 segundos em velocidade lenta;
- Adição de areia durante 30 segundos em velocidade lenta;
- Homogeneização dos materiais durante 60 segundos em velocidade alta;
- Descanso por 90 segundos para limpeza das laterais da argamassadeira e homogeneização manual da mistura.
- Mistura final da argamassa durante 60 segundos para argamassadeira em velocidade alta.

#### **4.2.5.2 Ensaio de consistência, adensamento, cura e capeamento dos corpos de prova**

Posteriormente, realizou-se o ensaio de mesa de consistência (Flow Table), a partir da norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Após o ensaio de consistência, foram utilizadas formas de 50x50x50 mm para a moldagem das argamassas de cal/CBC, enquanto que foram utilizados moldes metálicos e cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para as argamassas de cimento/CBC.

O processo de adensamento dos corpos de prova foi feito em mesa vibratória durante 60 segundos, para melhor compactação e retirada de vazios da argamassa.

Conforme especificação da ASTM C593 - 95 (2000), os corpos de prova de argamassa cal/CBC foram submetidos à cura térmica por 7 dias à 45 °C, enquanto que, após este período, estes foram mantidos em câmara úmida à temperatura ambiente (25°C) e umidade maior que 95% até os 28 dias de cura.

Após os procedimentos de moldagem, os corpos de prova de argamassa de cimento/CBC foram mantidos em uma sala fechada em e condição de cura não saturada, de modo a satisfazer as mesmas condições aplicadas às amostras utilizadas para as medidas elétricas. Estas foram acondicionadas em recipiente fechado para evitar perdas de umidade, com temperatura e umidade relativa próximas a  $25 \pm 3$  °C e  $70 \pm 5$ %, respectivamente.

Para garantir a regularidade das faces dos corpos de prova durante o ensaio de resistência à compressão, as amostras cilíndricas de argamassa de cimento/CBC passaram pelo processo de capeamento, por meio de um composto de enxofre e pozolanas.

#### ***4.2.5.3 Ensaio de Resistência à Compressão***

Os corpos de prova foram levados ao ensaio de resistência à compressão, fazendo uso de uma Máquina Universal de Ensaaios (Modelo EMIC ® PC200 e controlada pelo modelo DL30000). Para as argamassas de cal/CBC, os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias de cura, utilizando-se 3 corpos de prova para cada idade. O mesmo número de amostras foi utilizado para cada traço de argamassa de cimento/CBC, entretanto os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos aos 3, 7 e 28 dias de cura.

#### ***4.2.5.4 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade***

O ensaio de absorção de água por ascensão capilar foi feito aos 28 dias de cura para as argamassas de cimento/CBC, utilizando-se a metodologia descrita na NBR 9779 (2012).

Conforme o aparato experimental mostrado na Figura 4.3, os corpos de prova de argamassa foram mantidos em uma lâmina d'água constante a  $5 \pm 1$  mm acima da sua face inferior. Foram realizadas pesagens com 0,167 (10 min), 1,5 (90 min), 3, 6, 24, 48 e 72 horas de imersão, sendo o índice de absorção capilar expresso pela Equação 4.2:

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (4.2)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade;

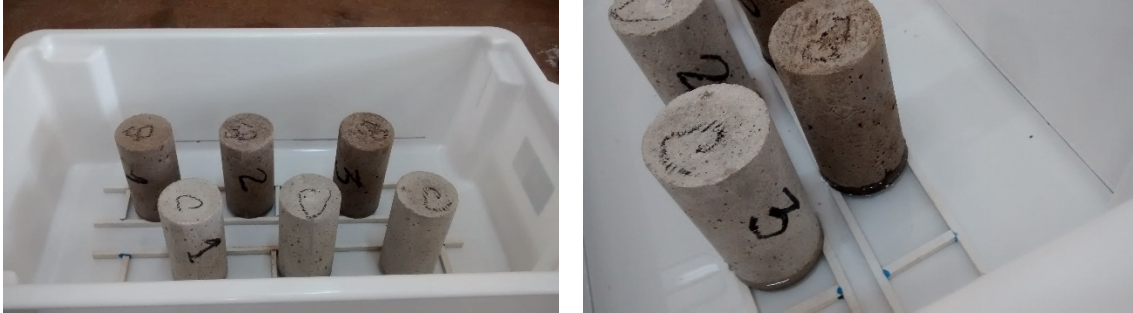
A = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado;

B = massa do corpo de prova seco, para temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C;

S = área da seção transversal do corpo de prova.



Figura 4.3 – Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade em corpos de prova de argamassa de cimento/CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 4.2.6 Aparato experimental para medidas de condutividade/resistividade e impedância elétricas

A Parte 3 dos resultados e discussões vem propor um modelo experimental para a avaliação da reatividade da CBC por meio das propriedades elétricas, fazendo uso de medidas de condutividade/resistividade e impedância elétricas.

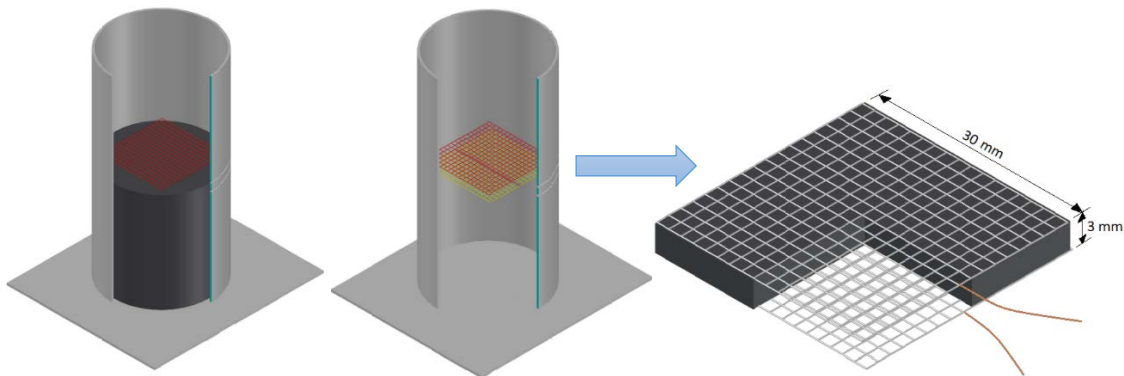
Inicialmente, para a produção dos eletrodos dos capacitores, fez-se uso de uma tela metálica conectada a fios de cobre por meio de soldagem com estanho.

Para dispersar melhor as cargas condutoras através da matriz metálica, as malhas foram submetidas ao banho de ultrassom, utilizando-se um equipamento de ultrassom convencional (Modelo *Ultra Cleaner T-14*).

A inserção dos capacitores nos corpos de prova de argamassa se deu a partir da construção de moldes de PVC, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, nas quais se executou duas fendas na altura média dos moldes e distantes 3,0 mm entre si. Sendo assim, o modelo experimental foi elaborado considerando duas malhas planas inseridas nas fendas durante o processo de adensamento dos corpos de prova de argamassa, de tal modo a formar um capacitor de placas paralelas e distantes 3 mm entre si. O adensamento se mostrou fundamental para garantir que o capacitor fosse ser totalmente preenchido pela argamassa.

A Figura 4.4 mostra o esquema da inserção da malha nos corpos de prova durante o processo de adensamento das argamassas, bem como o esquema do capacitor de placas paralelas.

Figura 4.4 - Aparato experimental para medidas de condutividade/resistividade e impedância elétricas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após o processo de cura (mencionado no item 4.2.5.2), conduziu-se à coleta das medidas elétricas. Para isso, foi utilizado o Método de Duas Pontas - Tensão  $\times$  Corrente (MDP) para a obtenção das medidas de condutividade e resistividade  $dc$ , bem como a Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE), por meio do circuito  $ac$ .

As medidas de corrente elétrica foram obtidas aplicando-se uma diferença de potencial de 3 V, utilizando uma fonte de tensão-corrente da *KEITHLEY Model 236 Source Measure Unit*. Considerou-se a área  $A$  do eletrodo da amostra como sendo  $300 \text{ mm}^2$  e a espessura  $L$  igual a 3 mm. Para cada mistura, foram confeccionados 3 corpos de prova, e os valores de condutividade e resistividade foram obtidos pela média aritmética das 3 medidas.

Além disso, foram obtidas medidas de capacitância e tangente de perda em função da frequência no intervalo de 10 Hz a 10 MHz, para diferentes tempos de cura. Sendo assim, utilizou-se um analisador de Impedância da *Hewlett Packard 4192A* acoplado a um sistema de aquisição de dados.

#### 4.2.7 Produção e ensaios aplicados aos corpos de prova de microconcreto

A avaliação da eficácia cimentante da CBC se deu por meio da produção de microconcretos, levando-se em consideração alterações nas relações agregado/cimento, água/material cimentante, consumo de CBC e idade de cura das amostras. As misturas de microconcreto foram elaboradas utilizando-se cimento Portland, CBC, areia média natural, pó de pedra, brita 0 e aditivo superplastificante.

Um estudo mais detalhado dos métodos de dosagem e consumos dos materiais será mostrado nas Partes 4 e 5 dos resultados e discussões.

#### **4.2.7.1 Mistura**

Após a pesagem dos materiais, iniciou-se o processo de mistura mecânica dos microconcretos em argamassadeira. Inicialmente, foram adicionados água, materiais cimentícios e aditivo superplastificante. A argamassadeira foi ligada a 124 rpm por 30 segundos e em seguida a 220 rpm por mais 30 segundos.

Posteriormente, foi adicionada areia, de maneira gradual, no tempo de 30 segundos, a 124 rpm. Em seguida, a argamassa foi misturada por mais 60 segundos a 450 rpm.

Da mesma forma, foi acrescentado gradualmente o pedrisco no tempo de 30 segundos, a 124 rpm, seguidos de mais 60 segundos de mistura na velocidade a 450 rpm.

A brita 0 também foi adicionada conforme o procedimento anterior, adicionando-a gradualmente no tempo de 30 segundos, a 124 rpm, seguidos de mais 60 segundos de mistura na velocidade a 220 rpm.

Posteriormente, se considerou 60 minutos de descanso para homogeneização e limpeza da mistura na cuba. Por fim, a mistura foi agitada por mais 90 segundos a 220 rpm.

A Figura 4.5 mostra a característica da mistura de microconcreto após o processo de homogeneização em argamassadeira.

Figura 4.5 – Mistura de microconcreto após homogeneização.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### **4.2.7.2 Ensaios de Consistência**

Após a mistura, foram avaliados os índices de consistência conforme prescrições da norma NBR 13276 - ABNT, 2016. Fixando-se a abertura em de  $290,0 \pm 10,0$  mm, este ensaio permitiu encontrar a relação água/cimento e consumo de aditivo superplastificante para garantir a mesma consistência, levando-se em conta a variação das relações agregado/cimento, água/material cimentante e consumo de CBC nas misturas.

Também foi adotado um ensaio de consistência utilizando o tronco de cone proposto por Gorisse (1981), com dimensões 5,0 x 10,0 x 15,0 cm (abertura superior, abertura inferior e altura, respectivamente), fixando-se a consistência em  $40,0 \pm 10,0$  mm. A consistência foi determinada, seguindo os parâmetros do ensaio de abatimento de tronco de cone (NBRNM 67 – ABNT, 1998), sendo que foram aplicados para cada uma das três camadas, 12 golpes com haste de dimensão de 8,0 mm.

#### ***4.2.7.3 Adensamento, cura e capeamento dos corpos de prova***

Uma mesa vibratória foi empregada na etapa de adensamento das misturas de microconcreto, com tempo de utilização de 60 segundos por molde. Para isso, foram utilizados moldes metálicos e cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Os corpos de prova confeccionados permaneceram em câmara úmida, e a cura se deu por meio de imersão em água saturada com cal.

Após o processo de cura, foi realizado o capeamento para regularização das faces dos corpos de prova cilíndricos. Utilizou-se, para isso, um composto de enxofre e pozolanas.

#### ***4.2.7.4 Ensaio de Resistência à Compressão Axial***

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados conforme descreve a NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando a Máquina Universal de Ensaio (Modelo EMIC ® PC200 e controlada pelo modelo DL30000). Os dados de resistência à compressão foram obtidos aos 7, 28, 90, 180 e 365 dias de cura, sendo utilizados 5 corpos de prova para cada traço definido e idade de ruptura.

As médias dos valores de resistência foram calculadas considerando o desvio relativo máximo, conforme item 3.6.3 da NBR 7215 (ABNT, 1997). Para desvios relativos máximos superiores a 6%, foram desconsiderados os valores discrepantes e calculadas novas médias, conforme prescreve o item 3.6.4 da NBR 7215 (ABNT, 1997).

### **4.2.8 Produção e ensaios aplicados aos corpos de prova de concreto**

A sexta parte dos resultados e discussões vem mostrar o estudo da eficácia cimentante da CBC por meio da produção de concretos de cimento Portland. Estas misturas foram elaboradas utilizando-se cimento Portland, CBC, areia média natural, brita 1 e aditivo superplastificante.

Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova se deram através da norma NBR 5738 (ABNT, 2016).

#### **4.2.8.1 Mistura**

Primeiramente, com a betoneira desligada, foram inseridos a areia média natural, brita 1 e aproximadamente 50% da água de amassamento. Em seguida, a betoneira foi ligada por um minuto para a mistura dos materiais.

Posteriormente, adicionou-se o cimento, CBC e o restante da água de amassamento, ligando-se a betoneira por mais três minutos, que foram seguidos de três minutos de descanso. Como etapa final, foi acrescentado o aditivo superplastificante, levando as misturas ao processo de homogeneização por 5 minutos.

#### **4.2.8.2 Ensaio de Consistência**

Após a retirada do concreto da betoneira, realizaram-se os ensaios de Abatimento do Tronco de Cone convencional, de dimensões 10,0 x 20,0 x 30,0 cm (abertura superior, abertura inferior e altura, respectivamente), conforme as recomendações da NBRNM 67 (ABNT, 1998). Para todas as misturas de concreto, adotou-se o índice de consistência de  $80,0 \pm 10,0$  mm.

#### **4.2.8.3 Adensamento, cura e capeamento dos corpos de prova**

Uma mesa vibratória foi empregada na etapa de adensamento das misturas, com tempo de utilização de 60 segundos por molde, procedendo com o preenchimento dos moldes em três camadas. Foram utilizados moldes de PVC cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em câmara úmida, submersos em água saturada com cal.

Antes da realização dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade, os corpos de prova foram submetidos ao processo de capeamento, utilizando-se enxofre e pozolana.

#### **4.2.8.4 Ensaio de Resistência à Compressão Axial**

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados conforme descreve a NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando a Máquina Universal de Ensaio (Modelo EMIC ® PC200 e controlada pelo modelo DL30000). Os dados de resistência à compressão foram obtidos aos 7, 28 e 90 dias de cura, sendo utilizados 5 corpos de prova para cada traço definido e idade de ruptura.

As médias dos valores de resistência foram calculadas considerando o desvio relativo máximo, conforme item 3.6.3 da NBR 7215 (ABNT, 1997). Para desvios relativos máximos superiores a 6%, foram desconsiderados os valores discrepantes e calculadas novas médias.

#### **4.2.8.5 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral**

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado conforme prescrições da norma NBR 7222 (ABNT, 2011), sendo os ensaios realizados aos 7, 28 e 90 dias de cura. Para o cálculo da resistência à tração ( $f_t$ ), utilizou-se a Equação 4.3:

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4.3)$$

Onde:

$P$  é a carga aplicada;

$D$  é o diâmetro do corpo de prova;

$L$  é o comprimento do corpo de prova.

#### **4.2.8.6 Ensaio do Módulo de Elasticidade**

Concomitantemente com o ensaio de resistência à compressão axial, se executou o ensaio de módulo de elasticidade, conforme está prescrito na norma NBR 8522 (ABNT, 2008). Determinou-se o módulo dos concretos para a idade de 28 e 90 dias de cura, utilizando 3 amostras de cada traço e para cada idade.

#### **4.2.8.7 Ensaio de Absorção de Água por Imersão**

Após os 28 e 90 dias de cura, 3 corpos de prova de cada dosagem de concreto foram separados para o ensaio de absorção de água por imersão. Conforme as prescrições da norma NBR 9778 (ABNT, 2009), o coeficiente de absorção é dado por:

$$\frac{M_{Sat} - M_S}{M_S} \times 100 \quad (4.4)$$

$M_{Sat}$  = massa do corpo de prova saturado;

$M_S$  = massa do corpo de prova seco em estufa.

#### ***4.2.8.8 Etapas do Programa Experimental***

A Figura 4.6 ilustra as etapas do Procedimento Experimental, nas quais representa o desenvolvimento do trabalho dividido em seis Partes.

A primeira Parte do trabalho refere-se à caracterização física e química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, de modo a comprovar sua utilização como adição mineral para a produção de matrizes cimentícias. Para isso, foram utilizadas as técnicas instrumentais Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Granulometria por Difração à Laser (ADL), Superfície Específica Blaine e Massa Específica, Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Na Parte 2, se avalia a reatividade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio da produção de pastas de cal/CBC e cimento/CBC, utilizando as técnicas de Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Além disso, também foram produzidas argamassas de cal/CBC para avaliação da reatividade segundo a norma ASTM C593 – 95 (2000).

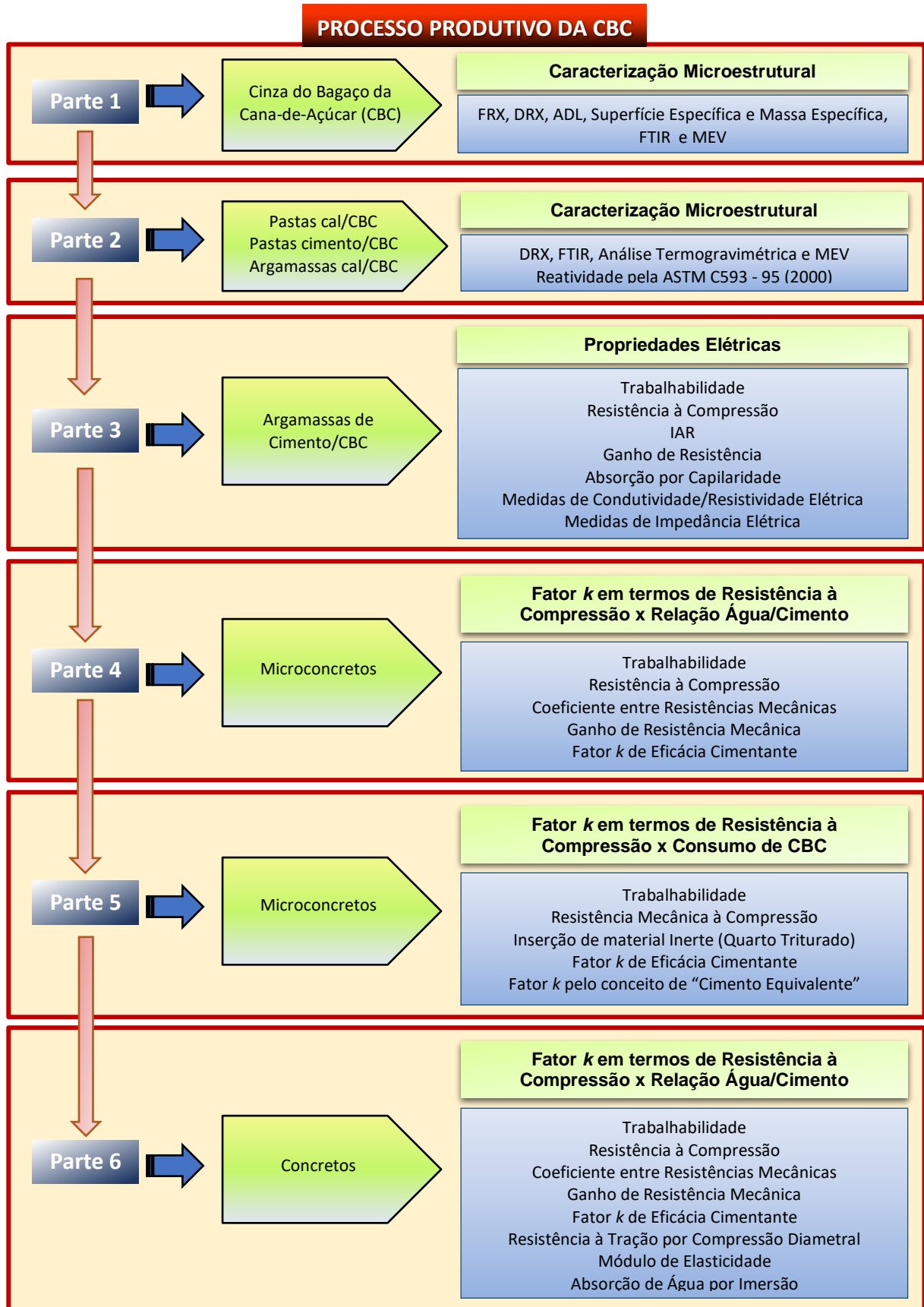
Na Parte 3, foi avaliada a influência da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas de cimento Portland, por meio das propriedades das misturas no estado fresco e endurecido, além das medidas elétricas de condutividade/resistividade e impedância.

A eficácia cimentante da cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi avaliada na Parte 4 desta tese de doutorado, por meio da produção de microconcretos. Neste sentido, foram utilizados modelos de cálculo para a obtenção do coeficiente de eficácia cimentante da CBC levando-se em conta os diversos teores de substituição de cimento Portland por pozolana e diferentes relações água/cimento.

A Parte 5 refere-se à obtenção do fator de eficácia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio de uma outra metodologia, que relaciona o incremento do consumo de CBC com os valores de resistência à compressão de microconcretos, mantendo-se o consumo de cimento Portland e a relação água/cimento constantes.

Por fim, a Parte 6 deste trabalho mostra o estudo da eficácia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio da produção de concretos, a partir de um modelo que relaciona os valores de resistência à compressão, a partir das diferentes relações água/cimento atribuídas às misturas.

Figura 4.6 - Diagrama esquemático dos procedimentos experimentais.



Fonte: Elaboração do próprio autor.



## Capítulo V

---

### Resultados e Discussões

## Parte 1

### *Caracterização Físico-Química da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar*

A avaliação da reatividade da CBC foi feita inicialmente por meio de técnicas instrumentais, que auxiliam na identificação da morfologia, mineralogia e componentes químicos da pozolana. As técnicas utilizadas foram: Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Granulometria por Difração à Laser (ADL), Superfície Específica Blaine e Massa Específica, Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os procedimentos e equipamentos utilizados encontram-se no Capítulo IV deste trabalho.

#### 5.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

A análise da composição química da CBC foi obtida por meio do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), sendo os resultados apresentados na Tabela 5.1. Para complementar a composição química em teores de óxidos percentuais, foi realizado o ensaio de perda ao fogo, definida no item 4.2.3.1 dos procedimentos experimentais.

Tabela 5.1 – Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (em porcentagem).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Outros	PF
68,4	7,6	6,5	2,8	1,2	0,4	2,0	0,9	1,6	1,5	0,5	6,6

PF - perda ao fogo

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo a norma ASTM C-618 (2015), uma pozolana de classe N e F deve apresentar, em sua composição química, um teor mínimo de 70% da somatória dos óxidos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os dados evidenciam o caráter silicoso da CBC, ao mesmo tempo em que apresenta um teor dos óxidos de 82,5%, atendendo os requisitos da ASTM C-618 (2015).

Em relação ao processo de queima da CBC sem controle de temperatura, Pereira (2014) produziu cinzas com maiores teores de SiO<sub>2</sub> (78,6%), entretanto o material foi caracterizado com menores porcentagens de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4,5% e 4,9%, respectivamente).

Nos estudos de Cordeiro et al. (2008), o material apresentou um alto teor de SiO<sub>2</sub> (78,3%) e quantidade razoável de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8,55%), próximos aos valores obtidos por Arif, Clark e Lake

(2016), enquanto que Arenas-Piedrahita et al. (2016) identificou teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  iguais a 66,1%, 15% e 7,2%, respectivamente.

As condições não controladas da temperatura também evidenciaram um ligeiro aumento da perda ao fogo (6,6%), o que fez superar o limite definido pela ASTM C-618 (2015) em 6%, para pozolanas de classe F. Percebe-se que uma parcela do material orgânico do bagaço de cana não foi totalmente calcinada; além disso, um baixo teor de CaO foi encontrado na cinza, o que traduz seu caráter não hidráulico.

Os álcalis (sódio e potássio) no clínquer de cimento Portland são provenientes, principalmente, dos compostos de argila presentes na mistura de matérias-primas e no carvão. Sua quantidade total expressa como  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$ ) pode variar de 0,2 a 1,5% (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

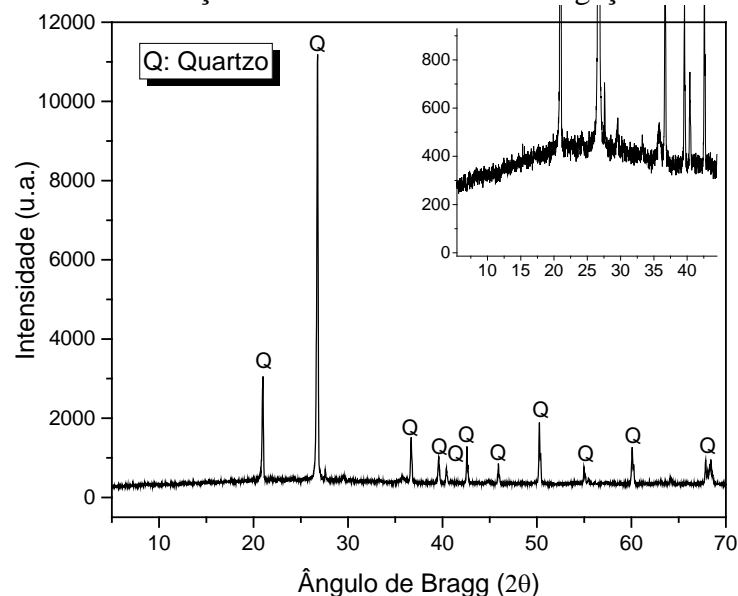
Neste caso, pode-se inferir que a CBC apresentou um teor de álcalis de 1,7%, sendo que este comportamento pode estar relacionado com contaminação do solo e maior concentração de matéria orgânica, confirmado no ensaio de perda ao fogo.

O teor de  $\text{SO}_3$ , por ser considerando um contaminante, deve ser de no máximo 4% e 5% para pozolanas de classe N e F, respetivamente; neste caso, a CBC evidenciou um valor bem menor (0,9%) ao máximo especificado pela norma ASTM C-618 (2015).

## 5.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (FRX)

A mineralogia da CBC pode ser caracterizada pelo ensaio de Difração de Raios X, conforme ilustra a Figura 5.1.

Figura 5.1 – Resultados da Difração de Raio-X da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

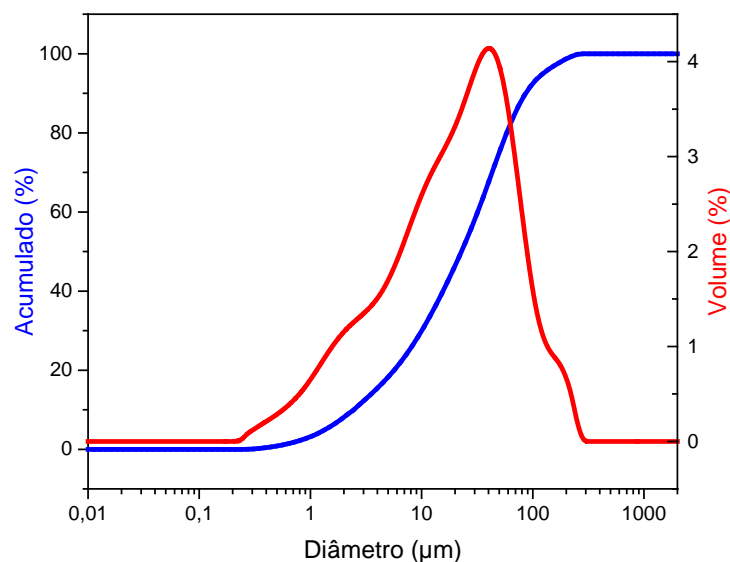
O quartzo é o material mais característico nas cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (PDF Card No. 78-1253), e o caráter mais cristalino evidenciado pelos picos pode ter relação direta com a contaminação pela areia oriunda do processo de colheita da cana-de-açúcar. O mesmo efeito foi constatado por Cordeiro, Toledo-Filho e Fairbairn (2009), Pereira (2014), Pinheiro (2015) e Paiva (2016).

Embora seja evidente o caráter cristalino da CBC, a ampliação da Figura 5.1 mostra que existe um desvio da linha de base entre  $2\theta=15\%$  e  $2\theta=35\%$ , o que há indícios de fases amorfas na cinza e que pode remeter à característica pozzolânica do material.

### 5.3 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER (ADL)

A influência do processo de moagem da CBC foi estudada por Cordeiro et al. (2008) e Pereira (2014), sendo que esta apresentou um tempo ótimo de 50 minutos para que as propriedades pozzolânicas da CBC fossem aprimoradas. Neste sentido, os efeitos dos procedimentos adotados pelos autores com relação à distribuição granulométrica da CBC são apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Distribuição granulométrica em porcentagem de volume e acumulada da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 5.2 abaixo mostra os valores de diâmetro médio da CBC, bem como as porcentagens  $d(0,1)$ ,  $d(0,5)$  e  $d(0,9)$ . Observa-se que a CBC apresenta um diâmetro médio de  $36,8 \mu\text{m}$ , ao passo que 90% das partículas estão abaixo de  $86 \mu\text{m}$ , 50% delas apresentam um diâmetro inferior a  $23 \mu\text{m}$  e 10% de CBC apresentam diâmetro inferior a  $2,4 \mu\text{m}$ .

Tabela 5.2 – Diâmetro médio,  $d(0,1)$ ,  $d(0,5)$  e  $d(0,9)$  da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

$d_{\text{médio}} (\mu\text{m})$	$d_{0,9} (\mu\text{m})$	$d_{0,5} (\mu\text{m})$	$d_{0,1} (\mu\text{m})$
36,816	86,279	22,842	2,431

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Estes valores estão de acordo com os parâmetros granulométricos obtidos por Pereira (2014). Enquanto que Arenas-Piedrahita et al. (2016) mostraram um diâmetro médio de 53,91  $\mu\text{m}$  para amostras de CBC que não passaram pelo processo de moagem, Paiva (2016) obteve um tamanho médio de partículas de 6,6  $\mu\text{m}$ , obtido durante 120 min de moagem. Isso mostra que o tratamento prévio da CBC pode acarretar uma maior reatividade pozolânica do material, associado ao preenchimento de poros e consequente densificação da matriz cimentícia ao longo do tempo de cura.

#### 5.4 SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE E MASSA ESPECÍFICA

A superfície específica é um parâmetro de grande importância, pois a elevada finura do material pode potencializar as reações pozolânicas (CORDEIRO et al., 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os valores normalmente encontrados de superfície específica Blaine para diferentes materiais são: cerca de 500  $\text{m}^2/\text{kg}$  para a escória de alto-forno (partículas menores do que 45  $\mu\text{m}$ ) e de 300 a 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  para a cinza volante (diâmetro médio de partículas em torno de 20  $\mu\text{m}$ ).

Em comparação com a área específica do Cimento Portland CP V-ARI, a Tabela 5.3 mostra que a CBC possui maior área superficial, da ordem de 810  $\text{m}^2/\text{g}$ , superando também a área específica da escória de alto-forno e cinza volante. Em função da CBC não evidenciar um diâmetro médio de partículas bastante inferior ao do cimento Portland, este incremento de área superficial pode ser atribuído à morfologia mais porosa da CBC.

Tabela 5.3 – Superfície Específica Blaine da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cimento Portland.

CBC $\text{m}^2/\text{kg}$	Cimento Portland CP V-ARI $\text{m}^2/\text{kg}$
806,9	458,1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Enquanto que a CBC produzida por Cordeiro et al. (2008) e Paiva (2016) apresentaram superfície específica Blaine em torno de 640  $\text{m}^2/\text{kg}$ , Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) obtiveram cinzas com superfície específica Blaine igual a 943  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

Os dados de massa específica da CBC são fundamentais para se determinar os consumos de materiais nas misturas de microconcretos e concretos, obtidos pelos métodos de dosagem racionais. A Tabela 5.4 mostra os dados de massa específica absoluta e aparente.

Tabela 5.4 – Massa Específica Absoluta e Aparente da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC).

Massa Específica Absoluta g/cm <sup>3</sup>	Massa Específica Aparente g/cm <sup>3</sup>
2,840	0,839

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao mesmo tempo em que a CBC apresenta maior superfície específica em relação ao cimento Portland, sua massa específica absoluta e aparente é menor em relação aos dados obtidos na caracterização do cimento Portland CP V-ARI (3,14 e 1,02 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente).

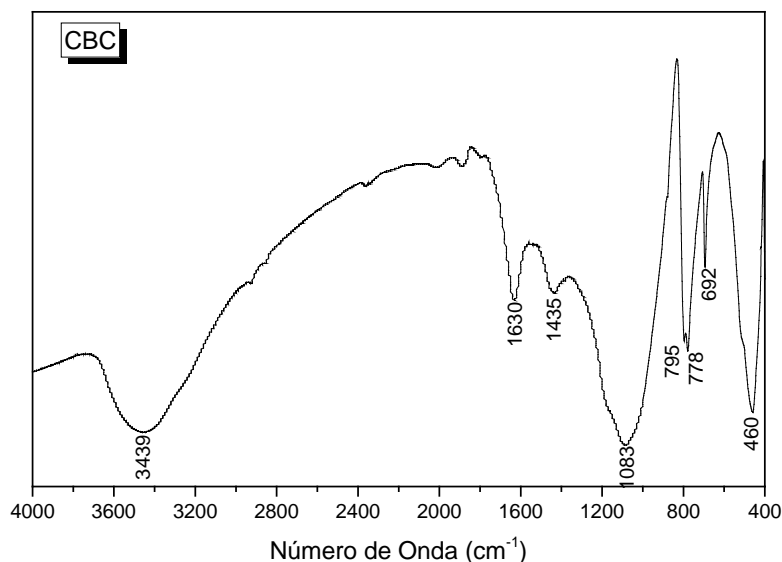
Por outro lado, o processo de produção da CBC levou à obtenção de maiores valores de massa específica em relação aos trabalhos de Paiva (2016) e Cordeiro (2006), que mostraram valores da ordem de 2,59 g/cm<sup>3</sup>. Mesmo assim, segundo os autores, os valores significativos foram atribuídos à contaminação por quartzo e ao reduzido teor de carbono.

## 5.5 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Os espectros de FTIR foram traçados no intervalo de comprimento de onda entre 4000 a 400 cm<sup>-1</sup> e a intensidade expressa em transmitância, conforme ilustra a Figura 5.3.

Segundo Tashima (2012), geralmente os materiais de origem silicoaluminoso, dentre eles o metacaulim e cinza volante, apresentam bandas muito características no espectro de infravermelho. Bandas situadas a 1010 cm<sup>-1</sup> estão associadas a vibrações de tensão assimétricas, correspondentes aos enlaces do tipo Si-O-Si e Si-O-Al. Uma segunda banda, centrada em 460 cm<sup>-1</sup>, caracteriza as vibrações devido as deformações dos enlaces Si-O-Si e Si-O-Al.

Figura 5.3 – Espectro de FTIR da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo Mansaneira (2010), quanto mais estreita e definida for a banda vibracional, mais cristalino é o material. Materiais amorfos apresentam vibrações irregulares em vários comprimentos de onda, e assim quando o espectro é gerado, há formação de grandes ruídos e bandas largas.

Primeiramente, é importante destacar que a grande maioria das bandas observadas no espectro são atribuídas às vibrações fundamentais da sílica (Si-O-Si), centradas em 460, 692, 778, 795 e 1083 cm<sup>-1</sup>. Além da banda centrada em 460 cm<sup>-1</sup>, que caracteriza as vibrações devido as deformações dos enlaces Si-O-Si e Si-O-Al, a banda em 692 cm<sup>-1</sup> é atribuída à deformação do anel Si-O-Si e confirma a presença de sílica do tipo quartzo. Observa-se que o alargamento da banda vibracional centrada em 1083 cm<sup>-1</sup> pode estar relacionada com a presença de quartzo na cinza.

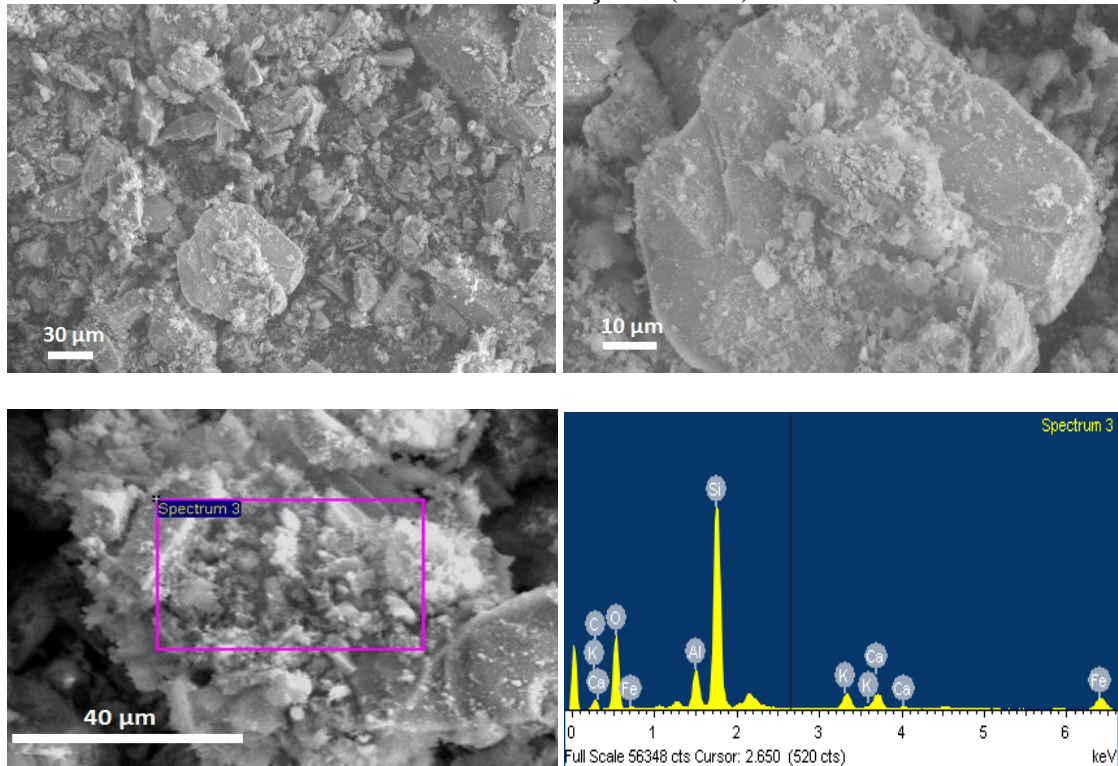
Também merece destaque a primeira banda do espectro, correspondente a 3439 cm<sup>-1</sup>, e que está relacionada às deformações dos enlaces O-H, ao mesmo tempo em que a banda centrada em 1630 cm<sup>-1</sup> é referente ao estiramento assimétrico de O-H.

Segundo Bassan (2015), a presença de matéria orgânica nas cinzas pode ser confirmada pelo alongamento vibracional da banda a 1440 cm<sup>-1</sup>, estando ligada às vibrações dos enlaces O-C-O.

## 5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A técnica de microscopia foi utilizada para avaliar a microestrutura das partículas de CBC, que incluem a forma, distribuição do tamanho e textura superficial. A Figura 5.4 identifica os aspectos mencionados.

Figura 5.4 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As micrografias evidenciam que a CBC apresenta um aspecto bastante irregular. Observa-se uma grande variabilidade de tamanhos das partículas, corroborando os resultados de granulometria a laser. Partículas de 2 µm a 90 µm são bastante evidentes nas imagens.

Além disso, a morfologia das partículas de CBC apresenta um caráter variável de suas formas, de característica prismática, tubular, aglomerada e pontiaguda. O mesmo efeito foi observado por Cordeiro et al. (2008), Chusilp, Jaturapitakkul e Kiattikomol (2009) e Arenas-Piedrahita et al. (2016).

As partículas de maior tamanho, em conjunto com seu caráter prismático, pontiagudo e denso, evidenciam a presença de quartzo não reativo, oriundo da contaminação do material durante a coleta.



O processo de queima não controlada da CBC, que foi submetida a uma temperatura máxima de 570 °C, parece ter provocado a combustão incompleta da pozolana. Este efeito, associado à perda de massa da adição no ensaio de FRX e a alta superfície específica Blaine, leva ao comportamento variável da textura superficial das partículas. O caráter rugoso observado também esteve associado ao aumento da porosidade das partículas.

A identificação da composição química das partículas foi feita por meio da espectroscopia dispersiva de energia (EDS), evidenciando a presença de silício, alumínio e ferro. Analogamente a Arenas-Piedrahita et al. (2016), as partículas prismáticas mostram a presença mais evidente de Si e O. Além de ser constatada a presença de álcalis potássio, a aglomeração de partículas porosas na região delimitada pelo Espectro 3 indicou a presença de carbono.

## 5.7 CONCLUSÕES

Os ensaios de caracterização da CBC evidenciaram suas propriedades físicas, químicas, morfológicas e mineralógicas, o que levou a concluir que:

- Os dados de FRX evidenciam o caráter silicoso da CBC, ao mesmo tempo em que apresenta um teor dos óxidos de 82,5%, atendendo os requisitos da ASTM C-618 (2015).
- Por meio do ensaio de DRX, observa-se que o quartzo é o material mais característico da CBC, entretanto observa-se um desvio da linha de base entre  $2\theta=15\%$  e  $2\theta=35\%$ , o que há indícios de fases amorfas na cinza e que pode remeter à característica pozolânica do material.
- A análise granulométrica mostra que as partículas de CBC apresentam um diâmetro médio de 36,8  $\mu\text{m}$ , ao passo que 90% das partículas estão abaixo de 86  $\mu\text{m}$ , 50% delas apresentam um diâmetro inferior a 23  $\mu\text{m}$  e 10% de CBC apresentam diâmetro inferior a 2,4  $\mu\text{m}$ .
- Em relação ao cimento Portland, a CBC possui maior superfície específica Blaine, entretanto sua massa específica absoluta e aparente é menor.
- Os ensaios de FTIR mostram que a grande maioria das bandas observadas no espectro são atribuídas às vibrações fundamentais da sílica (Si-O-Si). As vibrações dos enlaces O-C-O podem remeter à presença de matéria orgânica nas cinzas.
- Através do MEV pode se observar que a CBC apresenta partículas irregulares, de característica prismática, tubular, aglomerada e pontiaguda.

## Parte 2

### *Estudo da Reatividade Pozolânica da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar*

A reatividade da CBC também foi avaliada por meio de métodos físicos e mecânicos aplicados às pastas e argamassas de cal/pozolana, bem como em pastas de cimento/pozolana. As pastas foram caracterizadas a partir das técnicas de Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), enquanto que o desenvolvimento das reações foi analisado através dos procedimentos descritos na norma ASTM C593 – 95 (2000).

#### 6.1 PASTAS DE CAL/CBC

As pastas de cal/CBC foram elaboradas utilizando-se a proporção cal/pozolana de 5:5, e relação água/aglomerante igual a 0,7. As técnicas descritas foram realizadas aos 7, 28 e 90 dias de cura, sendo as proporções identificadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Proporções utilizadas em pastas de cal/CBC.

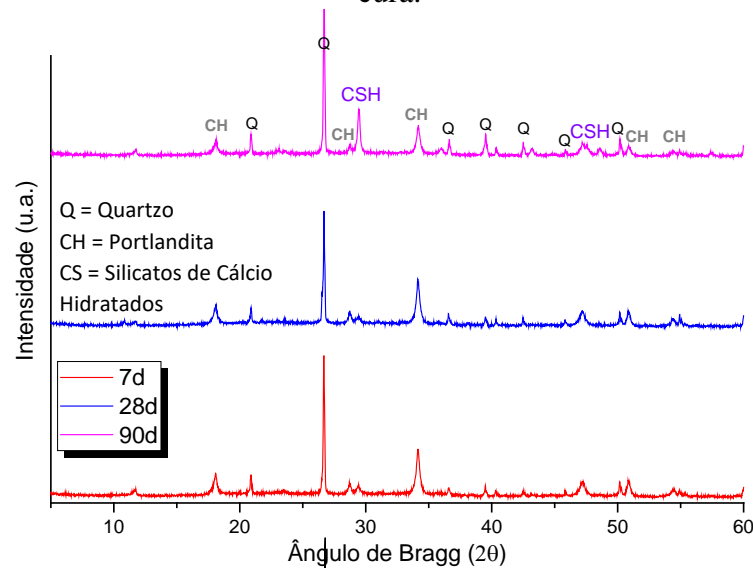
Pasta	Proporção Cal/CBC	Cal (g)	CBC (g)	Água (g)
CH-CBC	5:5	7,0	7,0	9,8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

##### 6.1.1 Difração de Raios X (DRX)

A análise de difração de raios X foi feita para avaliar o comportamento das reações pozolânicas da CBC, por meio da interação entre a disponibilidade de portlandita e a formação dos produtos de hidratação nas pastas. Os difratogramas são apresentados na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Resultados da Difração de Raios X de pastas CH-CBC ao longo do tempo de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

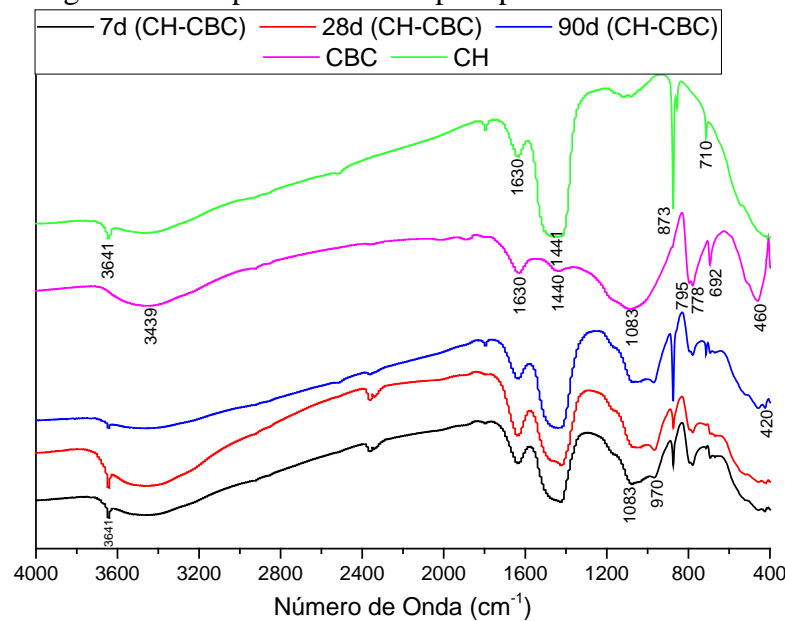
Observa-se que a redução dos picos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em  $2\theta=18,2^\circ$ ,  $34,3^\circ$  e  $51,05^\circ$  foi gradual ao longo do tempo do cura, levando à conclusão de que a CBC tem capacidade de consumir parte da portlandita ao longo do tempo de hidratação. Além disso, juntamente com os picos de quartzo cristalino obtidos em todas as pastas, os picos de CH não desapareceram aos 90 dias de cura, o que evidencia que a reatividade da pozolana pode ser prejudicada pela contaminação de solo durante a coleta do bagaço.

Ao passo que o consumo de portlandita foi reduzido em função das reações pozolânicas, picos bem característicos dos produtos de hidratação foram detectados em  $2\theta=29,5^\circ$  e  $47,3^\circ$ . Estes picos são correspondentes ao silicato de cálcio hidratado, o que leva à participação da parcela amorfa da CBC nas reações de hidratação ao longo do tempo de cura.

### 6.1.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR foram traçados no intervalo de comprimento de onda entre  $4000$  e  $400\text{ cm}^{-1}$  e a intensidade foi expressa em transmitância, conforme ilustra a Figura 6.2. Para efeitos de comparação, também são mostradas as curvas de FTIR da cinza (CBC) e da cal hidratada (CH).

Figura 6.2 – Espectro de FTIR para pastas de cal/CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As pastas constituídas de cal hidratada e CBC evidenciaram um comportamento em conjunto com as bandas vibracionais de cada componente. A banda centrada em  $1630\text{ cm}^{-1}$ , referente ao estiramento assimétrico de O-H, e  $1440\text{ cm}^{-1}$ , ligada às vibrações dos enlaces O-C-O, estiveram presentes em todas as pastas ao longo do processo de cura.

Ao mesmo tempo em que se visualiza uma redução da banda centrada em  $3640\text{ cm}^{-1}$  (para O-H reticulares do hidróxido de cálcio) ao longo do tempo de cura, se percebe o decréscimo da banda centrada em  $1083\text{ cm}^{-1}$  (vibrações de Si-O-Si), indicando que uma possível reação pozolânica ocorreu entre a sílica amorfa da CBC e a portlandita.

Em resposta à reação pozolânica, pode-se constatar que os produtos de hidratação se mostraram evidentes nas pastas; de fato, a banda centrada em  $970\text{ cm}^{-1}$  representa os silicatos de cálcio hidratados (vibrações de Si-O em géis C-S-H), sendo que estes foram mais evidentes aos 28 e 90 dias de cura. Além disso, os picos centrados na região de  $420\text{ cm}^{-1}$  evidenciam a presença de aluminatos e silicoaluminatos de cálcio de hidratados (VELÁZQUEZ, 2002).

Pode-se notar que os picos centrados em  $710\text{ cm}^{-1}$ ,  $873\text{ cm}^{-1}$  e  $1441\text{ cm}^{-1}$  aparecem de forma mais intensa, e que corresponde à carbonatação das amostras e/ou impurezas de  $\text{CaCO}_3$  na cal hidratada.

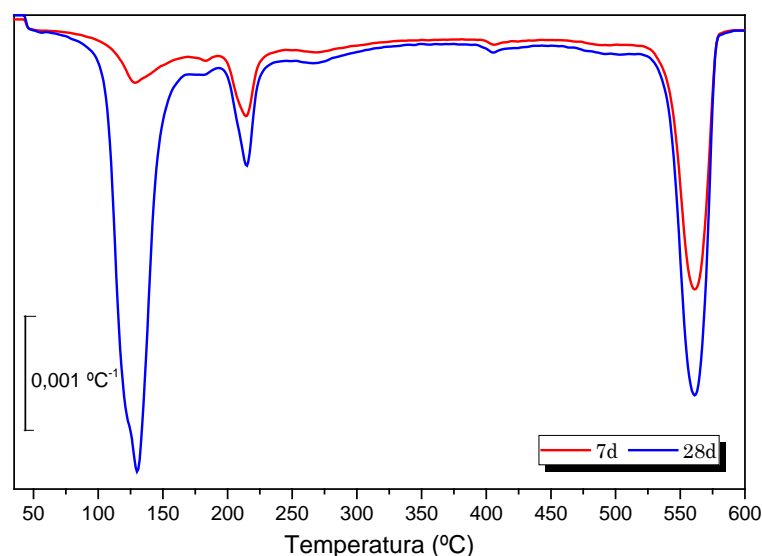
Considerando que a banda centrada em  $3641\text{ cm}^{-1}$  ainda permaneceu pouco evidente nas pastas aos 90 dias de cura, pode-se concluir que a CBC não possui a capacidade de consumir a totalidade de portlandita.

Ao mesmo tempo, a presença das bandas que caracterizam as vibrações de Si-O-Si ( $778\text{ cm}^{-1}$  e  $795\text{ cm}^{-1}$ ) na composição da cinza do bagaço e nas pastas de cal/CBC evidenciam que uma certa parcela do quartzo presente na adição mineral não é reativa.

### 6.1.3 Análise Termogravimétrica

O ensaio de análise termogravimétrica foi realizado em pastas de cal aos 7 e 28 dias de cura a  $20^\circ\text{C}$ . Os resultados da curva DTG podem ser vistos na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Resultados da Análise Termogravimétrica (curvas DTG) para pastas de cal/CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Primeiramente, nota-se que o hidróxido de cálcio não foi totalmente consumido aos 28 dias de cura, visto que ainda se percebe o pico na região da temperatura de  $550^\circ\text{C}$ . Por outro lado, o pico próximo a  $200^\circ\text{C}$  corresponde à formação de sílicoaluminato cálcico hidratado.

Outra forma de analisar a reação pozolânica através das curvas DTG é a determinação do hidróxido de cálcio que ficou sem reagir e, a partir dessa informação, calcular a taxa de cal fixada. Sendo assim, para o cálculo da fixação de cal, foi utilizada a Equação 6.1.

$$\%Ca(OH)_2 = \frac{CH_0 - CH_t}{CH_0} \times 100 \quad (6.1)$$

Sendo:

$CH_0$  - quantidade de cal inicial.

$CH_t$  - quantidade de cal sem reagir na pasta em um tempo de cura determinado.

A Tabela 6.2 apresenta os valores de perda de água total ( $P_T$ ), perda devido à desidratação do hidróxido de cálcio ( $P_H$ ), perda de hidratos (% de água combinada) e % de cal fixada das amostras de cal/CBC aos 7 e 28 dias de cura.

Tabela 6.2 – Perda de água total ( $P_T$ ), perda devido à desidratação do hidróxido de cálcio ( $P_H$ ), perda de hidratos (% de água combinada) e % de cal fixada das amostras cal/CBC aos 7 e 28 dias de cura.

Idade (dias)	$P_T$ (%)	$P_H$ (%)	% Água Combinada	% $\text{Ca(OH)}_2$
7	13,74	5,39	8,35	55,68
28	19,36	4,97	14,39	59,14

Fonte: Elaboração do próprio autor.

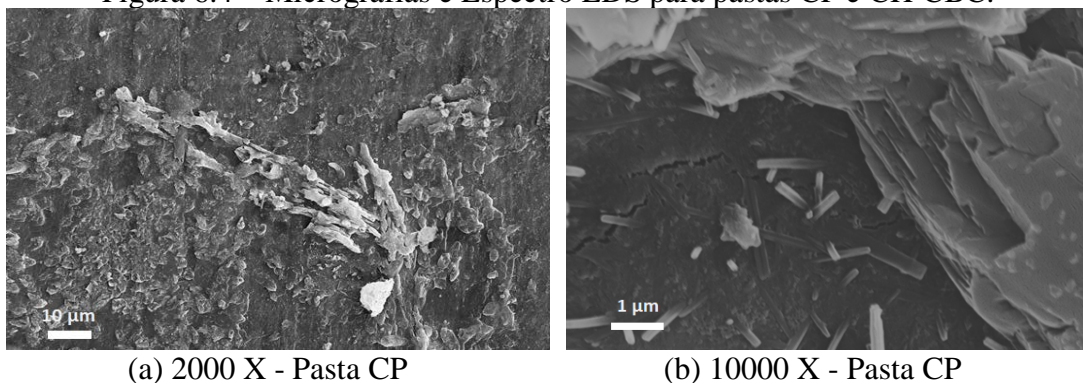
Observa-se que a parte amorfa da CBC é capaz de reacionar com o hidróxido cálcico das misturas, visto os incrementos dos valores de fixação de cal ao longo do tempo de cura. Além disso, a perda de massa total também aumentou com o tempo de cura, nas quais revela os produtos hidratados formados.

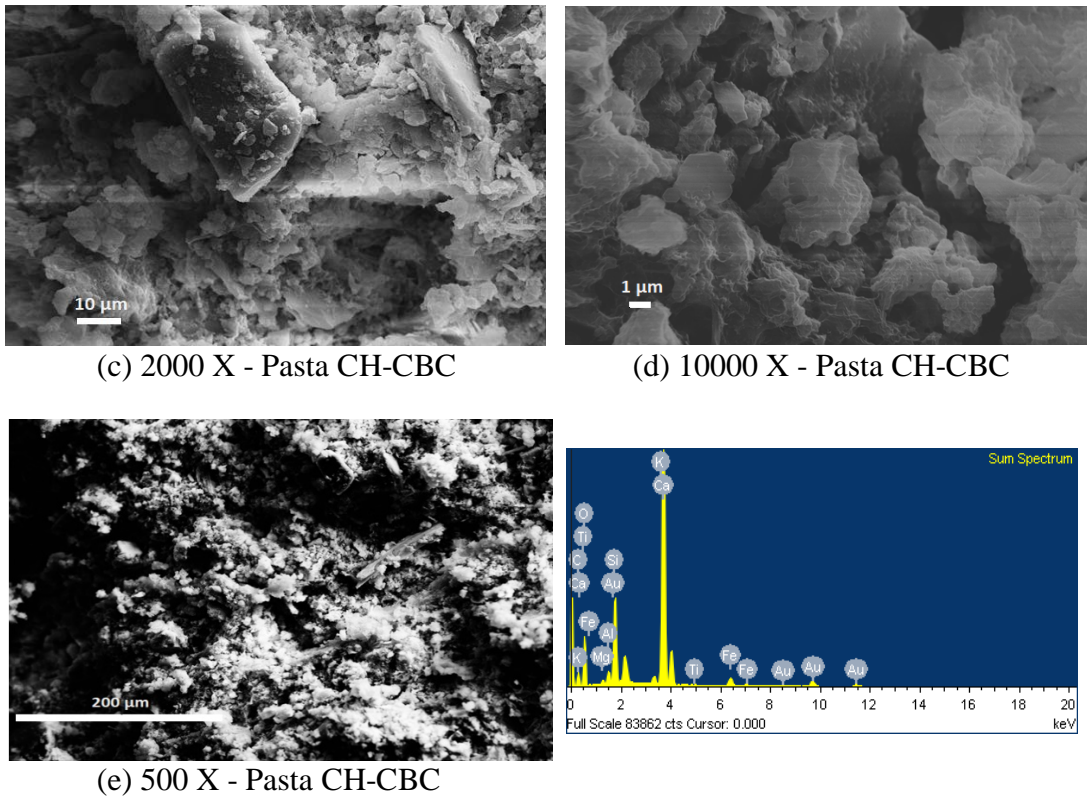
Sabendo que foram obtidos valores de perda de massa devido a desidratação do hidróxido de cálcio acima de zero, pode-se concluir que este não foi totalmente consumido pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

#### 6.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 6.4 abaixo mostra as Micrografias das pastas CH-CBC aos 90 dias de cura. Além disso, a identificação da composição química foi feita por meio da espectroscopia dispersiva de energia (EDS) na ampliação de 500 X da pasta. Para efeitos comparativos, também é mostrada a micrografia da pasta que contém apenas cimento e água (CP).

Figura 6.4 – Micrografias e Espectro EDS para pastas CP e CH-CBC.





Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 6.4 (a) mostra que a pasta de cimento Portland (CP) apresenta uma estrutura típica do gel C-S-H, formando uma rede conectada e bastante densa ao longo do tempo de cura. A ampliação (b) da Figura 6.4 (a) deixa evidente a presença de cristais fibrosos de portlandita.

A influência da inserção de CBC é visível nas Figuras 6.4 (c) e (d). As partículas de CBC estão praticamente recobertas pelos produtos de hidratação, o que leva à reação pozolânica da CBC com o hidróxido cálcico. O resultado das reações pode ser associado ao comportamento do espectro EDS, que evidencia a presença de cálcio e silício.

A Figura 6.4 (d) ampliada ainda mostra uma massa amorfa de C-S-H e a característica acicular dos produtos formados, demonstrando a tendência de que os grãos de CBC podem favorecer a deposição de C-S-H.

Por outro lado, a Figura 6.4 (c) mostra que uma parcela cristalina da CBC não reagiu com o hidróxido cálcico presente na mistura; de fato, percebe-se que a pasta de cal não encobre as partículas de quartzo da adição mineral.

## 6.2 PASTAS DE CIMENTO/CBC

As pastas de cimento/CBC (CP-CBC) foram elaboradas utilizando-se a proporção cimento/pozolana de 75/25 e relação água/material cimentante igual a 0,5. Para efeitos de comparação, foram elaboradas pastas constituídas apenas de cimento Portland (CP) e água, utilizando-se a proporção cimento/pozolana de 100/0 e relação água/cimento igual a 0,5. As técnicas descritas foram realizadas aos 7, 28 e 90 dias de cura, sendo as proporções identificadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Proporções utilizadas em pastas de cimento/CBC.

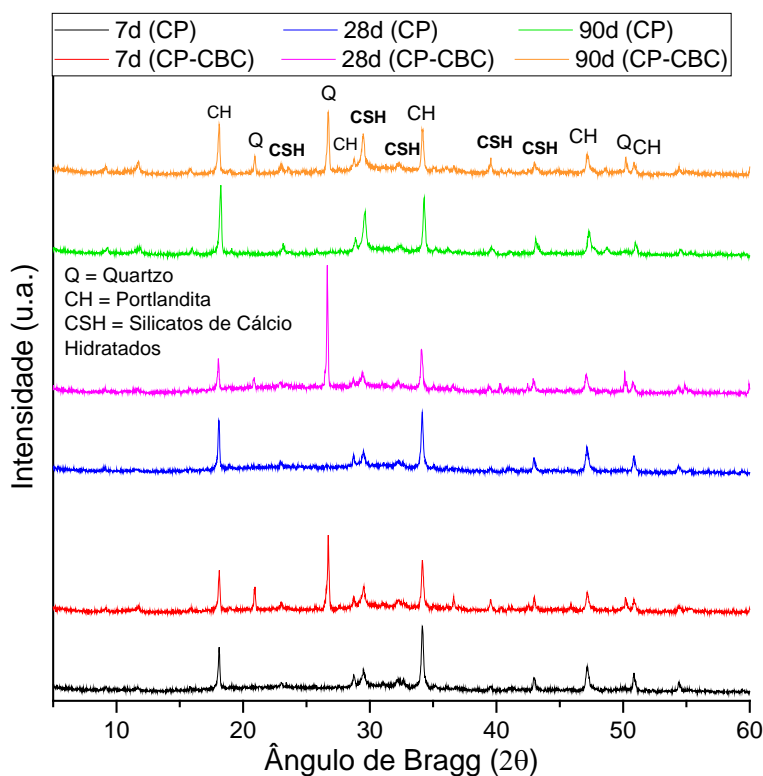
Pasta	Proporção Cal/CBC	Cimento (g)	CBC (g)	Água (g)
CP-CBC	75/25	15,0	5,0	10,0
CP	100/0	20,0	0,0	10,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 6.2.1 Difração de Raios X (DRX)

A composição mineralógica dos constituintes das pastas de cimento/CBC, bem como os produtos das reações de hidratação são mostrados nos difratogramas seguintes (Figura 6.5).

Figura 6.5 – Resultados da Difração de Raio-X de pastas CP-CBC ao longo do tempo de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.



Os picos mais evidentes constatados nos difratogramas refere-se ao quartzo cristalino ( $2\theta=20,99^\circ$  e  $26,81^\circ$ ), oriundos do processo de contaminação do material durante a coleta na usina sucroalcooleira. Neste caso, percebe-se que o material esteve presente nas pastas de cimento/CBC, ao mesmo tempo que este mineral não foi constatado na mistura controle (CP).

O crescimento dos picos de silicatos de cálcio ao longo do tempo de cura para as pastas CP deixa claro que as reações entre o cimento Portland e a água foram efetivas. Ao mesmo tempo, os picos referentes à portlandita foram reduzidos em função do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  durante os mecanismos de hidratação do cimento Portland.

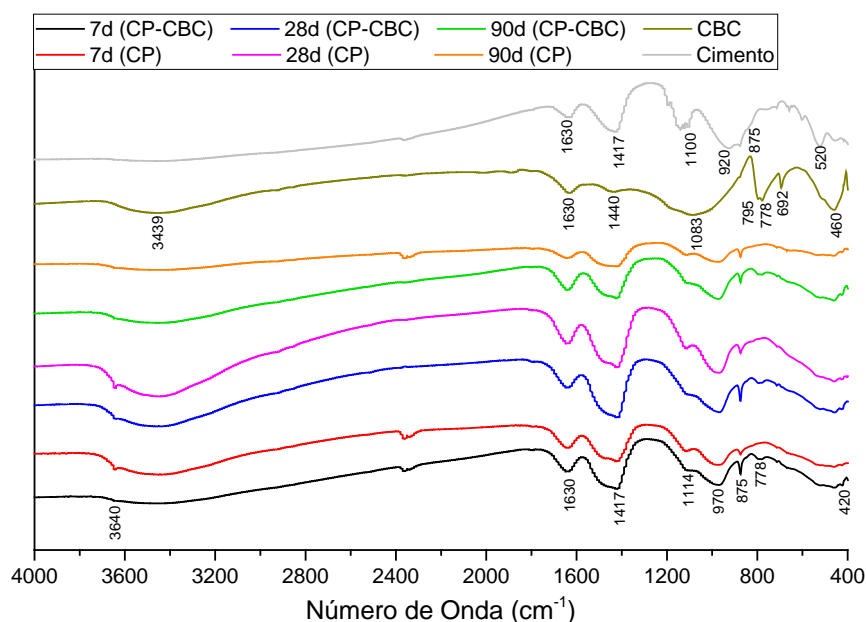
Para as pastas com adição de CBC, os picos referentes aos silicatos de cálcio hidratados são constatados; neste quesito, as reações pozolânicas entre a CBC e o cimento Portland podem ser evidenciadas pela técnica de DRX, quando se percebe que o incremento dos géis de C-S-H está associado à redução dos picos de portlandita, consumido por uma parcela da CBC.

Ainda é importante destacar que o efeito de crescimento dos picos de silicatos de cálcio foi mais evidente aos 90 dias de cura para as pastas CP-CBC, o que pode evidenciar que a CBC proporciona reações pozolânicas a longo prazo.

## 6.2.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR também foram traçados para avaliar as bandas vibracionais que possam traduzir as reações de hidratação entre o cimento Portland e a CBC. Também são mostrados os espectros da CBC e cimento Portland, conforme mostra a Figura 6.6.

Figura 6.6 – Espectro de FTIR para pastas de cimento/CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em comum à CBC e ao cimento Portland, as pastas de cimento/CBC apresentam a banda centrada em  $1630\text{ cm}^{-1}$ , referente ao estiramento assimétrico de O-H. Assim como observado na composição do cimento Portland, as pastas também apresentaram as bandas referentes a  $875$  e  $1417\text{ cm}^{-1}$ , que estão associadas às zonas de carbonatos.

Da mesma forma que observado nos espectros de FTIR das pastas de cal/CBC, a presença da banda que caracteriza as vibrações de Si-O-Si a  $778\text{ cm}^{-1}$  na composição da cinza do bagaço evidencia que uma certa parcela do quartzo presente na adição mineral não é reativa.

Para o cimento Portland, é interessante frisar a presença das bandas vibracionais centradas em  $520$  e  $920\text{ cm}^{-1}$ , nas quais são correspondentes à alita  $\text{C}_3\text{S}$ .

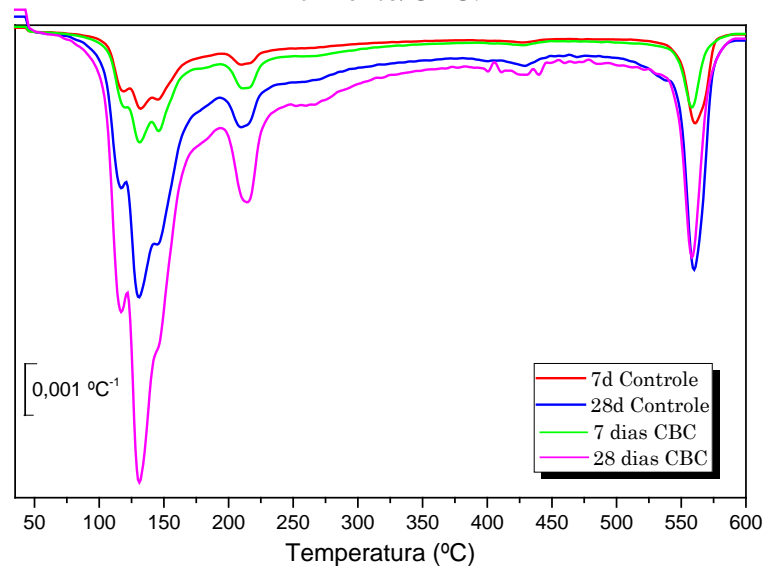
O entorno da banda vibracional a  $1100\text{ cm}^{-1}$  refere-se às vibrações de valência simétricas tanto de enlaces Si-O-Al e Si-O-Si, além de evidenciar a presença de gesso nas amostras. Para as pastas de cimento/CBC, esta banda parece evidenciar a presença de silicoaluminatos, responsáveis pelas reações pozolânicas entre o cimento Portland e a CBC. Além disso, a formação dos produtos de hidratação entre a sílica amorfa da CBC e a portlandita do cimento também pode ser caracterizada pela redução da banda centrada em  $3640\text{ cm}^{-1}$  (para O-H reticulares do hidróxido de cálcio), ao mesmo tempo em que se percebe o decréscimo da banda centrada em  $1083\text{ cm}^{-1}$  (vibrações de Si-O-Si) e o desaparecimento da banda centrada em  $692\text{ cm}^{-1}$  (deformação do anel Si-O-Si).

Enquanto que os picos centrados na região de  $420\text{ cm}^{-1}$  evidenciam a presença de aluminatos e silicoaluminatos de cálcio hidratados, os produtos de hidratação também se mostraram evidentes através da banda centrada em  $970\text{ cm}^{-1}$ , que representa os silicatos de cálcio hidratados (vibrações de Si-O em géis C-S-H).

### 6.2.3 Análise Termogravimétrica

O ensaio de análise termogravimétrica foi realizado em pastas de cimento aos 7 e 28 dias de cura a  $20^\circ\text{C}$ . Os resultados da curva DTG podem ser vistos na Figura 6.7.

Figura 6.7 – Resultados da Análise Termogravimétrica (curvas DTG) para pastas de cimento/CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A formação dos produtos de hidratação foi evidenciada através dos picos relativos à desidratação do hidróxido de cálcio ( $\cong 550^{\circ}\text{C}$ ), onde se percebe que estes são menores para as pastas de cimento com CBC, em relação às misturas controle. Além disso, os picos centrados em 150 - 250°C são devido à presença de silicoaluminatos cálcicos hidratados e aluminatos cálcicos hidratados. Entre 120-150°C, ocorre a presença de silicatos cálcicos hidratados.

A porcentagem de cal fixada também pode ser calculada através da Equação 6.2.

$$\%Ca(OH)_2 = \frac{(CH_c \times C) - CH_t}{CH_c \times C} \times 100 \quad (6.2)$$

Sendo:

$CH_c$  - quantidade de hidróxido de cálcio da pasta controle.

$CH_t$  - quantidade de cal em um tempo de cura determinado na pasta com substituição de cimento por cinza na mesma idade do controle.

$C$  - proporção de cimento na pasta com pozolana.

A Tabela 6.4 apresenta os valores de perda de água total ( $P_T$ ), perda devido à desidratação do hidróxido de cálcio ( $P_H$ ), perda de hidratos (% de água combinada) e % de cal fixada das amostras de cimento/CBC aos 7 e 28 dias de cura.

Tabela 6.4 – Perda de água total ( $P_T$ ), perda devido à desidratação do hidróxido de cálcio ( $P_H$ ), perda de hidratos (% de água combinada) e % de cal fixada das amostras cimento/CBC aos 7 e 28 dias de cura.

Amostra	Idade (dias)	$P_T$ (%)	$P_H$ (%)	% Água Combinada	% $\text{Ca(OH)}_2$
Controle	7	20,05	2,89	17,16	---
CBC	7	16,96	1,64	15,32	24,34
Controle	28	19,69	3,36	16,33	---
CBC	28	18,66	1,60	17,06	36,51

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que a parte amorfa da CBC é capaz de reacionar com o hidróxido cálcico das misturas, visto os incrementos dos valores de fixação de cal ao longo do tempo de cura. Além disso, o valor de perda devido a desidratação do hidróxido de cálcio é menor para as pastas constituídas de CBC, o que justifica a reação pozolânica.

### 6.3 ARGAMASSAS DE CAL/CBC – DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

A avaliação da reatividade da CBC também se deu por meio do método proposto pela Norma ASTM C593 - 95 (2000). A norma propõe um modelo para avaliar o desenvolvimento das reações através das medidas de resistência mecânica de argamassas de cal/pozolana, direcionada à aplicação de cinzas volantes, pozolanas naturais e artificiais.

#### 6.3.1 Produção das Argamassas

A norma ASTM C593 - 95 (2000) define a proporção de materiais secos na mistura conforme os dados mostrados na Tabela 6.5. Além disso, o consumo de água deve ser o necessário para que se atenda os parâmetros definidos no ensaio de mesa de consistência (Flow Table).

Tabela 6.5 – Consumo de materiais para argamassas de cal/CBC.

Material	Proporção (g)
Cal Hidratada	180
Pozolana (seca)	360
Areia graduada	1480
Água	356,4

Fonte: Elaboração do próprio autor

Foram utilizados corpos de provas de dimensões 50 x 50 x 50 mm, sendo que os procedimentos de mistura, adensamento, moldagem e ruptura dos corpos de prova de argamassa estão mencionados no item 4.2.5.2 da parte experimental.

O processo de cura dos corpos de prova foi feito por meio da cura térmica a 45° C por 7 dias, enquanto que, após este período, estes foram mantidos em câmara úmida à temperatura ambiente (25°C) e umidade maior que 95% até os 28 dias de cura.

### 6.3.2 Resultados das Argamassas

A Tabela 6.6 mostra a evolução da abertura de consistência das argamassas, para a execução de 30 quedas da mesa de consistência em aproximadamente 30 segundos.

Tabela 6.6 – Abertura de consistência para argamassas de cal/CBC.

Quedas	Abertura (mm)
30	295

Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir da definição da abertura de consistência de  $290 \pm 10$  mm, se obteve uma relação água/aglomerante igual a 0,66, que condiz com a relação obtida nas pastas de cal/CBC (0,7). De fato, a definição da relação água/aglomerante pode satisfazer o limite de abertura definido.

Os ensaios de resistência mecânica à compressão dos corpos de prova de argamassa foram realizados aos 7 e 28 dias de cura, sendo os resultados apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Resistência mecânica à compressão para argamassas de cal/CBC.

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
7	$4,0 \pm 0,5$
28	$6,6 \pm 0,2$

Fonte: Elaboração do próprio autor

Segundo a norma ASTM C593 - 95 (2000), a mínima resistência à compressão para argamassas de cal/pozolana deve ser de 4,1 MPa, aos 7 dias de cura. Após 21 dias de cura, este valor de mínima resistência deve ser mantido.

Observa-se que, aos 7 dias de cura, as argamassas apresentaram um valor de resistência à compressão pouco menor ao mínimo especificado. Por outro lado, aos 28 dias de cura, o valor de resistência mecânica superou em aproximadamente 61,0 % o mínimo especificado pela norma.

Neste quesito, o ensaio mecânico evidenciou a potencialidade da CBC como material pozolânico. Além disso, percebe-se que o desenvolvimento das reações da CBC com o hidróxido cálcico tende a ser mais efetivo a maiores tempos de cura.

#### 6.4 CONCLUSÕES

A reatividade da CBC foi avaliada através da produção de pastas de cal/CBC e cimento/CBC, conduzindo às conclusões:

- Nos ensaios de DRX, ao passo que se observa uma redução dos picos de  $\text{Ca(OH)}_2$  em função das reações pozolânicas, picos bem característicos dos produtos de hidratação foram detectados o que leva à participação da parcela amorfa da CBC nas reações de hidratação ao longo do tempo de cura.
- Os ensaios de FTIR indicam que as reações pozolânicas entre a sílica amorfa da CBC e a portlandita podem ser efetivadas através da redução das bandas vibracionais de O-H e Si-O-Si. Ao mesmo tempo, observa-se a formação dos produtos de hidratação através de bandas vibracionais de Si-O em géis C-S-H.
- A partir dos ensaios de análise termogravimétrica, observa-se que CBC é capaz de reacionar com o hidróxido cálcico das misturas, visto os incrementos dos valores de fixação de cal ao longo do tempo de cura.
- As micrografias revelam a presença de uma massa amorfa de C-S-H e a característica acicular dos produtos formados, em função da reação pozolânica da CBC com o hidróxido cálcico.
- O método proposto pela Norma ASTM C593 - 95 (2000) evidenciou o caráter pozolânico da CBC, levando à conclusão de que o desenvolvimento das reações da pozolana com o hidróxido cálcico tende a ser mais efetivo a maiores tempos de cura.

## Parte 3

### *Avaliação do caráter pozolânico da CBC através de Propriedades Mecânicas e Elétricas*

A correlação entre as propriedades microestruturais dos materiais cimentícios e suas propriedades mecânicas e de durabilidade têm sido cada vez mais difundidas no ramo da ciência dos materiais. Nesse sentido, algumas técnicas experimentais são utilizadas para medir as propriedades elétricas de pastas, argamassas e concretos de Cimento Portland, pois, além de permitir avaliar o progresso de corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, é possível avaliar a evolução do processo de hidratação do Cimento a curtas e longas idades.

Sendo assim, nas seções seguintes serão abordadas as propriedades elétricas que auxiliarão na caracterização da Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar, por meio da produção de argamassas de cimento Portland. Para isso, será utilizando o Método de Duas Pontas - tensão  $\times$  corrente (MDP) para a obtenção das medidas de Condutividade e Resistividade, bem como a Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE).

#### **7.1 ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS À BASE DE CIMENTO PORTLAND E CBC**

Segundo Velázquez (2002), Tashima (2006) e Martínez-Velandia (2006), o uso de adições minerais em compósitos cimentícios a base de cimento Portland está associado a uma porcentagem ótima de utilização. Esta porcentagem ótima depende das características da adição mineral estudada, além dos efeitos físicos e químicos gerados pelo uso da adição nos compósitos à base de cimento Portland. A primeira parte deste capítulo consiste no estudo da inserção da CBC em corpos de prova de argamassa, para avaliação das propriedades mecânicas ao longo do tempo de cura.

##### **7.1.1 Nomenclatura e Dosagem para produção de Argamassas**

Para o estudo da influência da porcentagem de CBC nas propriedades elétricas e mecânicas, foram produzidas misturas de argamassa com relação água/material cimentante igual a 0,5 e relação agregado/material cimentante igual a 2,5. As misturas de argamassa foram elaboradas utilizando os materiais:

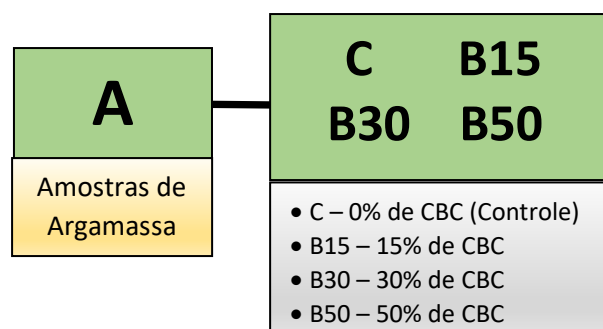
- Aglomerante: Cimento Portland CP V-ARI;

- Agregados Miúdo: Areia Média Natural;
- Água potável;
- Pozolana: Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBC).

Nestas condições, foram definidas cinco porcentagens de substituição de Cimento Portland por CBC, dadas em: 0% (Controle), 15%, 30% e 50% de CBC em relação à massa de Cimento Portland.

A nomenclatura utilizada para designar as misturas se apresenta de forma:

Figura 7.1 – Nomenclatura para designar as misturas de argamassa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O fator água/material cimentante foi definido para que as misturas apresentassem bons índices de consistência mesmo sem a utilização de aditivos superplastificantes, para melhor avaliação do efeito da CBC nas propriedades elétricas. Além disso, a baixa relação areia/material cimentante foi definida para que não houvesse tanta influência da porosidade das argamassas nas medidas de resistividade/condutividade e impedância elétricas.

Apesar de ser conhecido que altos teores de CBC (acima de 30% em substituição ao cimento Portland) remetem a reduções expressivas nos valores de resistência à compressão de argamassas, se decidiu incluir a mistura A – B50 para analisar os efeitos do alto consumo de pozolana nas propriedades elétricas.

As dosagens das misturas estão definidas na Tabela 7.1 abaixo.

Tabela 7.1 – Dosagens de Argamassas para variações nas porcentagens de CBC.

Mistura	% CBC	Consumos (g)			
		Cimento	Areia	Água	CBC
A - C	0,0	500,0	1250,0	250,0	0,0
A – B15	15,0	425,0	1250,0	250,0	75,0
A – B30	30,0	350,0	1250,0	250,0	150,0
A – B50	50,0	250,0	1250,0	250,0	250,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.



Os procedimentos de mistura, adensamento e moldagem dos corpos de prova de argamassa estão mencionados no item 4.2.5.2 da parte experimental.

### 7.1.2 Trabalhabilidade

O efeito do aumento do consumo de CBC nas propriedades das argamassas no estado fresco foi avaliado por meio do ensaio de Mesa de Consistência (Flow Table).

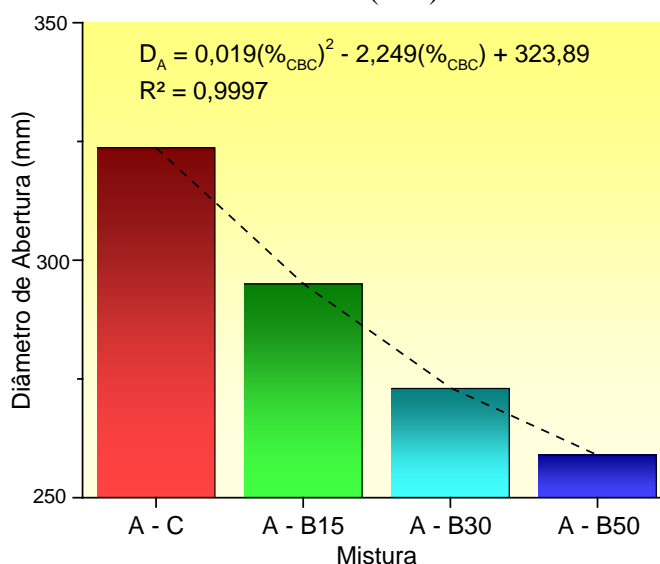
Os valores médios de abertura encontram-se na Tabela 7.2 abaixo, e a comparação entre os traços constituídos de CBC com as misturas controle encontram-se na Figura 7.2 subsequente.

Tabela 7.2 – Diâmetro de abertura de consistência de argamassas cm CBC (mm).

A - C	A - B15	A - B30	A - B50
324,0	295,0	273,0	259,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 7.2 – Influência da porcentagem de CBC na trabalhabilidade de argamassas de cimento Portland (mm).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 7.2 mostra com evidência que o incremento no consumo de CBC causa redução da trabalhabilidade das misturas de argamassa, e essa tendência pode mostrar uma correlação favorável entre o consumo de CBC e os valores de abertura de consistência. Neste sentido, o modelo que melhor descreve os dados experimentais é o Polinomial de Ordem 2, conforme equação identificada na figura, com valor de  $R^2$  próximo a 1.

Os dados mostram, portanto, que a CBC requer uma maior demanda de água para requerer a trabalhabilidade constante. Tashima (2012) menciona que, de um modo geral, as adições minerais de elevada reatividade, dentre elas a sílica ativa e cinza da casca de arroz, apresentam elevada superfície específica, o que traduz numa maior demanda de água.

Este mesmo comportamento esteve associado às misturas de argamassas constituídas de CBC, levando a uma possível conclusão que a morfologia e textura da pozolana levaram à tendência observada. De fato, em relação às propriedades do cimento Portland, a CBC apresenta menor massa específica absoluta e maior superfície específica, e que, associados ao caráter poroso, de formato irregular e com textura superficial rugosa, pode traduzir nos menores diâmetros de abertura de consistência. O valor mais significativo de perda ao fogo da CBC (6,6%), que evidencia a presença de matéria orgânica na cinza, também pode ter influenciado no aumento da demanda de água das argamassas no estado fresco.

Arenas-Piedrahita et al. (2016) e Arif, Clark e Lake (2016) ainda mencionam que a forma prismática das partículas de CBC aumenta o atrito entre as partículas de cimento, fazendo com que uma grande porcentagem de vazios devam ser preenchidos com água para garantir o escoamento das misturas.

### **7.1.3 Resistência Mecânica à Compressão**

A fim de correlacionar as propriedades elétricas obtidas pela inclusão de CBC em compósitos com as propriedades mecânicas, foram produzidos corpos de prova de argamassa de dimensões 5 x 10 cm para análise da Resistência Mecânica à Compressão, aos 3, 7 e 28 dias de cura.

Os procedimentos de ruptura dos corpos de prova de argamassa estão mencionados no item 4.2.5.3 da parte experimental.

Além disso, deve se levar em conta que, após o procedimento de moldagem, os corpos de prova foram mantidos em uma sala fechada e em condição de cura não saturada, de modo a satisfazer as mesmas condições aplicadas às amostras utilizadas para as medidas elétricas. Estas foram acondicionadas em recipiente fechado para evitar perdas de umidade, com temperatura e umidade relativa próximas a  $25 \pm 2$  °C e  $70 \pm 5$ %, respectivamente.

A Tabela 7.3 abaixo mostra os resultados de resistência Mecânica à Compressão (média e desvio padrão) dos corpos de prova de argamassa ao longo do tempo de cura.

Tabela 7.3 – Resistência à Compressão de Argamassas em função do teor de substituição de CBC e tempo de cura.

Mistura	% CBC	Tempo de Cura (dias)		
		3	7	28
Resistência à Compressão (MPa)				
A - C	0,0	34,2 ± 2,8	40,4 ± 2,2	52,7 ± 3,1
A – B15	15,0	36,1 ± 1,3	40,0 ± 3,6	48,4 ± 4,6
A – B30	30,0	33,7 ± 1,8	39,4 ± 1,3	47,4 ± 1,0
A – B50	50,0	25,5 ± 0,7	30,5 ± 0,3	36,5 ± 1,4

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que todas as dosagens tiveram suas resistências mecânicas incrementadas com o aumento do tempo de cura, o que evidencia as reações de hidratação entre o cimento/CBC e a água.

Além disso, é nítida a influência da inserção de CBC nas propriedades mecânicas das argamassas ao longo do tempo de cura. Aos 3 e 7 dias de idade, percebe-se que as misturas com 15% e 30% de CBC em relação à massa de cimento proporcionam valores de resistência mecânica próximos ao controle; ainda a mistura A – B15 merece destaque, ao mostrar um incremento de aproximadamente 5,5% no valor de resistência aos 3 dias de idade.

Neste contexto, o efeito de moagem do material pozolânico após o processo de peneiramento parece ter proporcionado os maiores valores de superfície específica da CBC, em relação ao obtido para o cimento Portland. Esse processo, em consonância com a porcentagem ótima de CBC, parece ter fundamentado os efeitos de nucleação heterogênea nas primeiras idades de cura; nos efeitos de nucleação, as partículas dos hidratos formados ao redor das partículas de cimento são depositadas sobre as partículas da adição mineral, permitindo que os grãos de cimento possam continuar hidratando-se, o que permite o aumento da velocidade de hidratação do cimento (SORIANO, 2007).

O efeito da inserção de altas porcentagens de CBC vem de encontro às observações feitas por diversos autores (GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL, 2007; ARENAS-PIEDRAHITA et al., 2016), levando à conclusão de que substituições maiores que 20% de CBC em relação à massa de cimento pode afetar negativamente a resistência à compressão de argamassas e concretos. Este efeito foi bem mais pronunciado para a mistura A – B50, constatando-se reduções de até 30,8% aos 28 dias de cura, em relação à mistura controle, o que parece estar associada à natureza parcialmente cristalina da CBC, em particular à baixa presença de sílica amorfa evidenciado no ensaio de DRX.

Aos 28 dias de cura, nota-se que as reduções de resistência mecânica dos traços com CBC em relação às misturas controle foram mais pronunciadas. O mesmo efeito foi obtido por Arenas-Piedrahita et al. (2016), para as misturas de argamassas com 10% de CBC em relação à massa de cimento Portland. Entretanto, o autor verificou que este efeito foi revertido aos 56, 90 e 180 dias, mostrando que a reatividade da CBC é mais evidente em idades de cura mais avançadas (CHUSILP, JATURAPITAKKUL e KIATTIKOMOL, 2009; GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL, 2007).

Neste sentido, se dará maior atenção à reatividade a longo prazo da CBC na produção de microconcretos, descrita na Parte 4 dos resultados e discussões, para a obtenção dos valores de coeficientes  $k$  de eficácia cimentante.

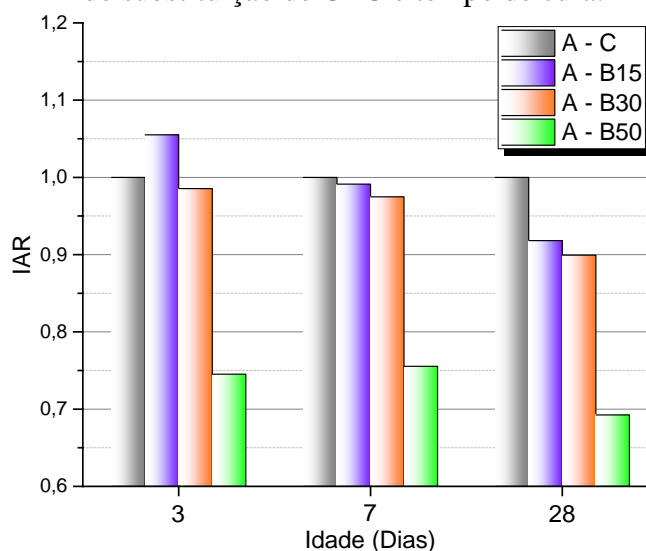
#### 7.1.4 Coeficiente entre Resistências à Compressão de Argamassas

A atividade pozolânica de um material também pode ser avaliada por meio da razão entre as resistências das misturas com pozolana e as misturas controle (Equação 7.1). Segundo Tashima (2012), quanto maior esta relação, maior é a reatividade da adição mineral, visto que, com um menor consumo de cimento, a mistura com adição pode ser capaz de proporcionar elevadas resistências mecânicas.

$$\text{Coeficiente} = \frac{R_{C_{poz.}}}{R_{C_{contr.}}} \quad (7.1)$$

Na Figura 7.3 abaixo estão registrados os valores dos coeficientes em função da porcentagem de CBC e tempo de cura das misturas de argamassa.

Figura 7.3 – Coeficiente entre Resistências à Compressão para argamassas em função do teor de substituição de CBC e tempo de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os efeitos da inserção de CBC nas misturas foi bem mais pronunciado nas idades iniciais de cura, visto que os índices de atividade resistente estiveram bem próximos a 1. Essa característica pode ser atribuída às misturas A – B15 e A – B30, sendo que ambas levaram à redução gradual dos índices com o aumento do tempo de cura.

A norma ASTM C-618 (2015) define um valor mínimo de Índice de Atividade Resistente (IAR) de 0,75 para classificar o material em estudo como pozolana de classe F, aos 7 e 28 dias de cura. Neste sentido, se as condições fossem válidas para as misturas de argamassa, poderia-se inferir que as dosagens com 15 e 30% de CBC em relação à massa de cimento Portland satisfariam os requerimentos da norma, pois os valores de coeficiente sempre estiveram acima de 0,9.

Por outro lado, é evidente que a mistura com 50% de CBC não estaria de acordo com as exigências da ASTM C-618 (2015), alcançando valores próximos ao mínimo especificado apenas aos 7 dias de cura. Foram constatados índices de 75%, 76% e 69% aos 3, 7 e 28 dias de cura, respectivamente.

Cordeiro e Kurts (2017) mencionam que, ao substituir o material pozolânico por um material inerte (denominado quartzo ultrafino), para um consumo de 35% de substituição volumétrica de cimento Portland, os índices de atividade resistente estiveram em torno de 58% aos 7 dias e 67% aos 28 dias de cura, o que mostra um expressivo efeito de diluição. Além disso, para cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diâmetros  $D_{50}$  igual a 30  $\mu\text{m}$ , os autores obtiveram IAR iguais a 0,61 e 0,74, aos 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Para este mesmo tempo, valores de IAR de 0,85 e 0,99 foram obtidos para cinzas com 7,0  $\mu\text{m}$ , enquanto que valores de IAR de 0,92 e 1,06 foram obtidos para cinzas com 4,5  $\mu\text{m}$ .

Associada à baixa fração reativa da CBC, altos teores de substituição de cimento por pozolana também pode levar à redução da quantidade de portlandita disponível para as reações, em função do menor consumo de cimento, sendo que este comportamento pareceu ainda mais evidente aos 28 dias de cura.

De modo geral, pode-se levar em consideração que, até os 28 dias de cura, existe a viabilidade em se trabalhar com misturas de argamassa que contenham até 30% de CBC em relação à massa de cimento Portland, demonstrando a atuação da CBC como material pozolânico.

### 7.1.5 Ganho de Resistência para Argamassas com CBC

Com a incorporação de uma adição mineral em matrizes cimentantes, existe a redução do consumo de cimento Portland, e que, associado aos efeitos físicos de diluição, são observadas quedas nas resistências mecânicas que são proporcionais à quantidade de adição incorporada (APONTE, 2010).

Sendo assim, o efeito de diluição pela inserção de uma pozolana também pode ser avaliado por meio da porcentagem de ganho de resistência (SG%), definido na Equação 7.2, visto que a substituição de cimento Portland acarretará na contribuição exclusiva desta propriedade pela inserção de pozolana (SORIANO, 2007).

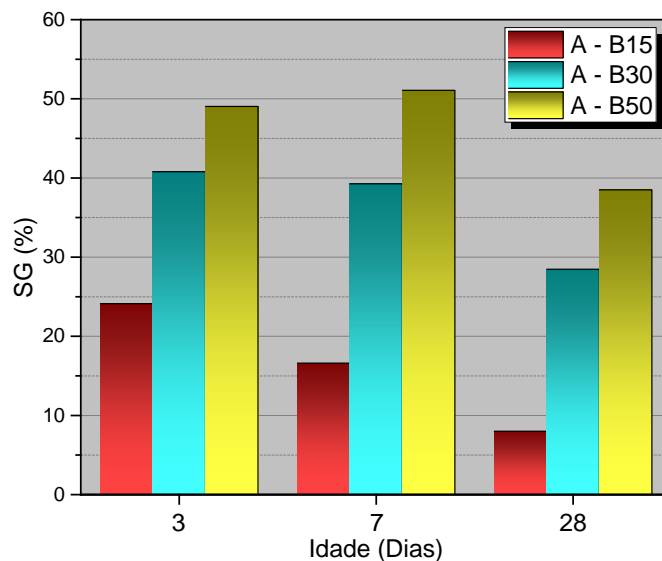
$$SG(\%) = \frac{|R_{c_{poz.}} - (R_{c_{contr.}} * cem_{\%})|}{R_{c_{contr.}} * cem_{\%}} * 100 \quad (7.2)$$

Considerando que:

$R_{c_{poz.}}$  indica a resistência à compressão das argamassas com adição de CBC,  $R_{c_{contr.}}$  é a resistência à compressão das argamassas sem adição de CBC (Controle) e  $cem_{\%}$  é a proporção de cimento na mistura de argamassa com substituição (em relação à parte unitária).

A Figura 7.4 apresenta os resultados do Ganho de Resistência (SG) em função do tempo de cura para cada teor de substituição de CBC.

Figura 7.4 – Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de misturas de argamassa constituídas de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em geral, percebe-se que a CBC proporciona valores positivos de ganho de resistência para todos os teores de substituição e idades de cura, o que demonstra a atuação pozolânica do material. Não foram obtidos valores negativos de SG, o que caracterizaria o efeito inerte da CBC.

As melhorias nas propriedades do ganho de resistência de argamassas pela inserção de CBC estiveram compreendidas entre 8% e 51%, e estes incrementos foram proporcionais ao teor de CBC incluído nas misturas. Ao mesmo tempo, também se observa que as porcentagens de ganho foram reduzidas ao longo do tempo de cura.

Neste sentido, os efeitos de diluição parecem ter sido pouco expressivos nas idades iniciais, visto que a inserção de maiores teores de CBC e redução do consumo de cimento não levou à proporcionalidade de redução das resistências mecânicas.

Ao mesmo tempo, considerando que o consumo de água se manteve constante para os consumos de cimento/CBC, é importante destacar que as reações pozolânicas foram efetivas mesmo para altos teores de CBC, o que não denota o caráter hidráulico do material.

#### **7.1.6 Absorção de Água por Capilaridade**

Segundo Wei, Xiao e Li (2012), as propriedades dos materiais porosos à base de cimento, tais como resistência mecânica e propriedades de transporte, dependem principalmente do espaço dos poros e da morfologia da fase sólida.

Ao mesmo tempo, a absorção de água por capilaridade pode ser um requisito necessário para julgamento da durabilidade de argamassas e concretos, uma vez que eles são submetidos aos processos de intempéries como chuvas e ao contato direto com águas associadas a agentes agressivos.

O ensaio de absorção de água por ascensão capilar foi feito aos 28 dias de cura, utilizando-se a metodologia descrita na NBR 9779 (2012), para corpos de prova de argamassa de dimensões 5 x 10 cm. O modelo de ensaio encontra-se na seção 4.2.5.4 da parte experimental, e os resultados obtidos estão explicitados na Tabela 7.4 abaixo.

Tabela 7.4 – Absorção de Água por Capilaridade de Argamassas com adição de 0%, 15%, 30% e 50% de CBC em relação à massa de Cimento Portland, aos 28 dias de cura.

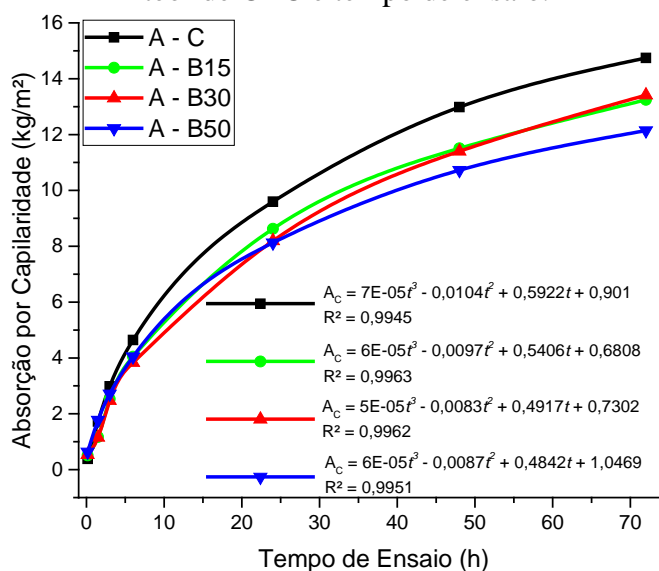
Tempo de Ensaio (h)	Mistura			
	A - C	A - B15	A - B30	A - B50
	<b>Absorção Capilar (kg/m<sup>2</sup>)</b>			
0,167 (10 min)	0,39	0,51	0,53	0,64
1,5 (90 min)	1,72	1,17	1,16	1,78
3	2,98	2,53	2,47	2,71
6	4,64	4,05	3,84	4,04
24	9,60	8,63	8,19	8,12
48	12,99	11,51	11,40	10,72
72	14,75	13,24	13,41	12,14

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os benefícios causados pela inserção de CBC nas propriedades de absorção de água por capilaridade são visivelmente constatados nos resultados. Vale destacar que a inclusão do tempo de ensaio aos 10 min e 90 min puderam evidenciar que a taxa de absorção é, no geral, mais elevada para as misturas constituídas de CBC. Este comportamento pode estar associado ao caráter mais poroso da cinza, que pode proporcionar uma absorção superficial inicial maior.

Além disso, um comportamento bastante similar foi constatado nos incrementos de absorção por capilaridade ao longo do tempo de ensaio, conforme ilustra a Figura 7.5, sendo que a previsão teórica dos dados poderia ser implementada através do modelo de regressão polinomial de ordem 3.

Figura 7.5 – Evolução da absorção de água por capilaridade em argamassas, em função do teor de CBC e tempo de ensaio.

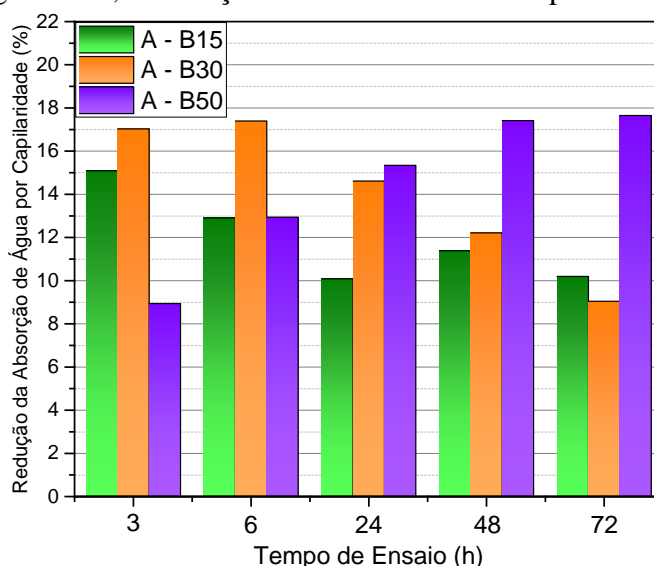


Fonte: Elaboração do próprio autor.



Conforme mostra a Figura 7.6, as reduções dos coeficientes de absorção foram bastante expressivas para todas as misturas com adição de CBC a partir das 3 horas de ensaio. Enquanto que as misturas com 15% e 30% de CBC proporcionaram maiores reduções de absorção até as 6 horas de ensaio, a mistura com 50% de CBC parece evidenciar uma taxa de absorção menor ao longo do tempo de ensaio, em particular às 48 e 72 horas.

Figura 7.6 - Porcentagem de redução dos valores de absorção de água por capilaridade para argamassas, em função do teor de CBC e tempo de ensaio.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas primeiras 72 horas de ensaio, Paiva (2016) verificou que, para concretos de classe C25, as reduções nos valores da absorção capilar foram em torno de 40% para as misturas com 10% e 15% de CBC, em relação à mistura controle. Para os concretos de alto desempenho, essas reduções foram de 17% e 26%, respectivamente, para as misturas constituídas de 10% e 15% de CBC, se comparados com a mistura referência. Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) também encontraram reduções de até 32% com a utilização de 15% de CBC em concretos.

Neste sentido, os valores de absorção em relação às misturas controle podem estar atribuídos à atividade pozzolânica da cinza, ao refinamento e interconectividade da estrutura de poros. Ao mesmo tempo, a elevada superfície específica e massa específica da CBC, bem como a distribuição do tamanho de partículas, podem ter levado à maior densificação da pasta de cimento.

## 7.2 ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS EM ARGAMASSAS À BASE DE CIMENTO PORTLAND E CBC

O aparato experimental identificado no item 4.2.6 foi montado para se medir as propriedades elétricas das argamassas por meio de um modelo de contato com a amostra, inserindo-se um capacitor de placas planas e paralelas durante a moldagem dos corpos de prova.

Conforme descrição detalhada, as malhas foram distanciadas em 3,0 mm na metade da altura dos corpos de prova de dimensões 5 x 10 cm, a fim de minimizar a resistência e área de contato entre a malha metálica e a argamassa; para garantir com que o capacitor fosse totalmente preenchido pela argamassa, as placas foram inseridas na mistura fresca, durante os procedimentos de moldagem e adensamento.

As medidas elétricas foram iniciadas 1 hora após o procedimento de mistura em argamassadeira. Da mesma forma que definido para os ensaios de resistência à compressão, os corpos de prova foram mantidos em uma sala fechada em e condição de cura não saturada, e estes foram acondicionadas em recipiente fechado para evitar perdas de umidade, com temperatura e umidade relativa próximas a  $25 \pm 3$  °C e  $70 \pm 5\%$ , respectivamente.

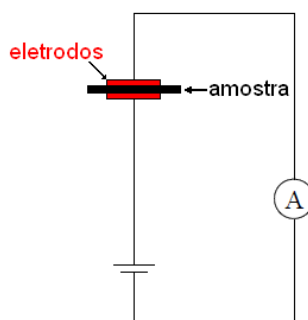
## 7.3 CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

### 7.3.1 Métodos de Duas Pontas (MDP) - Tensão x Corrente

O estudo da condutividade/resistividade  $dc$  pode ser feito pelo Método de Duas Pontas (MDP), sendo que este método consiste em colocar uma amostra do material a ser estudado entre dois eletrodos; então, um campo elétrico conhecido é aplicado entre os eletrodos e uma resposta resultante é observada.

Ao submeter o material a uma diferença de potencial (*d.d.p.*) entre as áreas metalizadas das amostras, ele responde com uma corrente elétrica, conforme esquema definido na Figura 7.7.

Figura 7.7 - Esquema do método de duas pontas para medidas de condutividade  $dc$  das amostras.



Fonte: Silva (2013).

Quando se aplica uma tensão elétrica no material, obtém-se uma corrente elétrica. Define-se como resistência elétrica ( $R$ ) a relação:

$$R = \frac{V}{i} \quad (7.3)$$

Sendo  $V$  o potencial aplicado e  $i$  a corrente que surge como resposta ao potencial aplicado.

A resistividade ( $\rho$ ) pode ser entendida como uma medida da oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica; ou seja, quanto menor a resistividade, maior será a facilidade do material em conduzir corrente elétrica (maior será a sua condutividade,  $\sigma$ ).

A resistividade é definida como sendo:

$$\rho = \frac{J}{E} \quad (7.4)$$

Onde  $J$  é a densidade de corrente no material e  $E$  é o campo elétrico aplicado no material.

A resistência e a resistividade de um dado material estão relacionadas por:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (7.5)$$

Onde  $L$  é a espessura e  $A$  é a área metalizada da amostra.

Define-se como condutividade o inverso da resistividade, sendo:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (7.6)$$

A partir das equações (7.5) e (7.6), chega-se a uma expressão para o cálculo da condutividade  $dc$ :

$$\sigma = \frac{L}{R.A} \quad (7.7)$$

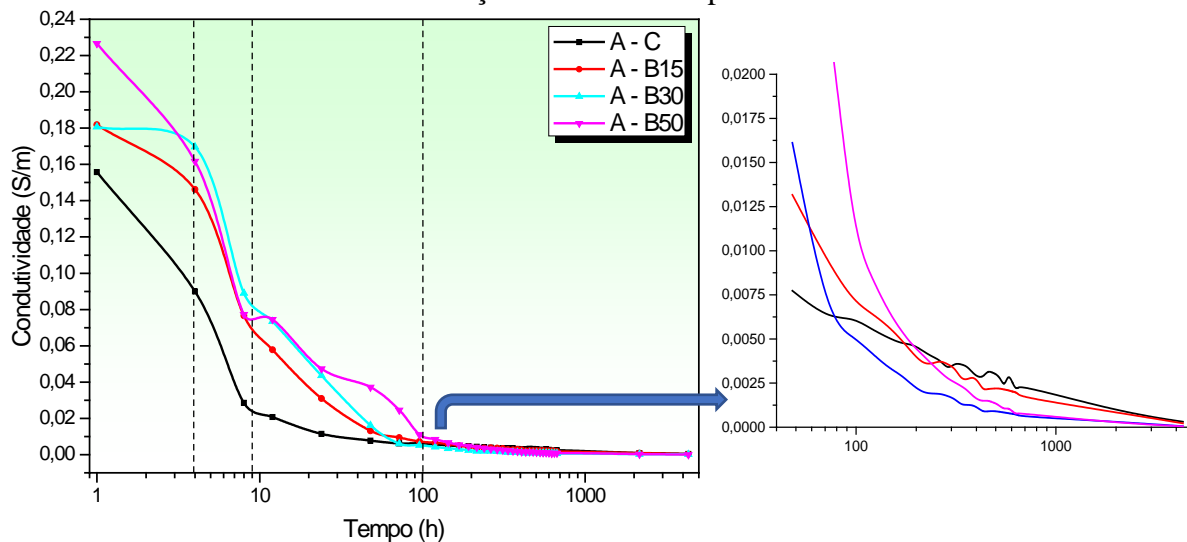
As medidas de corrente elétrica foram obtidas aplicando-se uma diferença de potencial de 3 V, utilizando uma fonte de tensão-corrente. Considerou-se a área  $A$  do eletrodo da amostra como sendo 300 mm<sup>2</sup> e a espessura  $L$  igual a 3 mm. Para cada mistura, utilizaram-se 3 amostras, e os valores de condutividade e resistividade foram obtidos pela média aritmética das 3 medidas.

Inicialmente, as medidas de corrente elétrica foram feitas nas primeiras 24 horas com intervalos a cada 4 horas. Após este período, as medidas foram realizadas a cada 24 horas, até se completar 28 dias de cura das argamassas. Por fim, as medidas foram registradas aos 90 e 180 dias de cura.

### 7.3.2 Resultados de Condutividade/ Resistividade Elétrica

A Figura 7.8 mostra a evolução da condutividade elétrica das argamassas em função do tempo de cura e porcentagem de substituição de CBC em relação à massa de cimento Portland.

Figura 7.8 – Condutividade Elétrica das misturas de argamassa, em função do teor de substituição de CBC e tempo de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As medidas de condutividade elétrica têm sido utilizadas para avaliar a evolução microestrutural de compósitos cimentícios, e diversos trabalhos têm evidenciado que o desenvolvimento dos produtos de hidratação tem refletido nas mudanças de condutividade ao longo do tempo (MC CARTER, STARS e CHRISP, 2000; MANCHIRYAL e NEITHALATH, 2009; SANISH, NEITHALATH e SANTHANAM, 2013; TSONOS et al., 2009). Além disso, estes estudos também têm evidenciado que os vários estágios do mecanismo de hidratação do cimento Portland estão associados à taxa de liberação de calor ao longo do tempo, e este comportamento pode estar correlacionado com as medidas de condutividade elétrica.

Com base no modelo proposto por Sanish, Neithalath e Santhanam (2013), fica claro que o aparato experimental pode proporcionar um comportamento bastante habitual frente às reações de hidratação das pastas de cimento. Portanto, é de extrema importância avaliar o comportamento da inclusão de CBC nas argamassas.

De fato, o uso de CBC provocou o aumento de condutividade elétrica nos primeiros dias de cura. Apesar disso, as curvas apresentam o mesmo comportamento da curva referente à mistura controle, o que pode confirmar a distribuição homogênea da pozolana através da matriz cimentícia mesmo nas idades iniciais de cura.

Em função das medidas de condutividade terem sido iniciadas após 1 hora, não se verifica o pequeno incremento nos valores de resistividade nas primeiras 1,2 horas, entretanto estes valores continuam elevados.

Inicialmente, é importante destacar que os efeitos de mobilidade iônica parecem ser mais pronunciados nas primeiras 1,2 horas para as misturas com CBC. De fato, efeitos de granulometria da adição, que proporciona um melhor refinamento dos poros, não são associados aos incrementos de condutividade nas idades iniciais.

Enquanto que as misturas com 15% e 30% de CBC mostraram valores de condutividade próximos entre si, a mistura A – B50 apresentou condutividade mais elevada. Neste caso, é interessante levar em consideração que uma parcela da CBC não sofre reação em função da presença de quartzo, e, descontando-se este consumo de material da relação água/material cimentante, existe a tendência de gerar uma relação água/cimento efetiva maior. Em consonância com Wei e Li (2006), a principal contribuição na condutividade elétrica em até 1 hora de hidratação é obtida a partir dos íons hidroxilas, com concentrações da ordem de 60% a 80% nas amostras de soluções.

Da mesma forma, a alta superfície específica da CBC, associado ao seu formato irregular, parece proporcionar um efeito de aprisionamento da água, proporcionando um melhor contato para a formação de um caminho contínuo através da matriz cimentícia.

A Figura 7.8 mostra que a formação dos produtos de hidratação C-S-H de 1,2 às 4 horas de hidratação foi evidente para todas as misturas, entretanto a taxa de reação pode ser distinta entre as misturas controle e com adição de CBC. De fato, neste intervalo, os efeitos da inclusão de CBC parecem traduzir na taxa de perda de mobilidade iônica e a formação dos produtos de hidratação até o final do período de indução. Os efeitos de mobilidade iônica e retenção de água parecem ser evidentes nas misturas com 15% e 30% de CBC, sendo que a menor taxa de redução da condutividade pode levar à formação mais lenta dos produtos de hidratação para estas misturas. Enquanto que a mistura controle segue com a perda expressiva de condutividade, o alto consumo de CBC da mistura A – B50 pode ter levado à absorção significativa de água, em função de sua superfície específica elevada e caráter poroso.

Durante o período de aceleração, definido entre as 4 e 10 horas de cura, percebe-se que a condutividade reduziu drasticamente para todas as misturas com CBC, e a taxa de redução se mostrou em maior amplitude para as misturas constituídas de adição. Em função da rápida formação dos produtos de hidratação C-S-H e CH, pode-se inferir a CBC se mostra capaz de combinar com a portlandita liberada pela hidratação do cimento Portland. Além disso, os efeitos de nucleação heterogênea parecem estar evidentes neste período, nas quais os pontos de

nucleação levam à precipitação do produto C-S-H, acelerando as reações de hidratação do cimento.

A partir das 10 horas de cura, observa-se que a perda de condutividade de argamassas com CBC ainda é gradual, e que o período de aceleração parece ser presente e estendido em até 48 horas para as misturas A – B15 e A – B30, enquanto que esse tempo permanece em até aproximadamente 100 horas para a mistura A – B50. Da mesma forma, Manchiryal e Neithalath (2009) e Sanish, Neithalath e Santhanam (2013) verificaram que adições minerais como fíler calcário, sílica ativa e cinza volante modificaram as misturas até um período de 10 horas.

Durante o período de desaceleração, existe a tendência de inversão dos valores de condutividade, em que as argamassas constituídas de CBC proporcionam menores valores em relação à mistura controle, conforme mostra a ampliação da Figura 7.8. Enquanto que este comportamento foi identificado aos 3 dias de cura para a mistura A – B30, a inversão ocorreu aos 8 dias de cura para as misturas A – B15 e A – B50. Este comportamento é um indicativo de que as reações pozolânicas pela inclusão da CBC ocorre de maneira gradual, mas que tende a garantir o mesmo progresso de hidratação a longos períodos de cura, se comparado com as misturas controle.

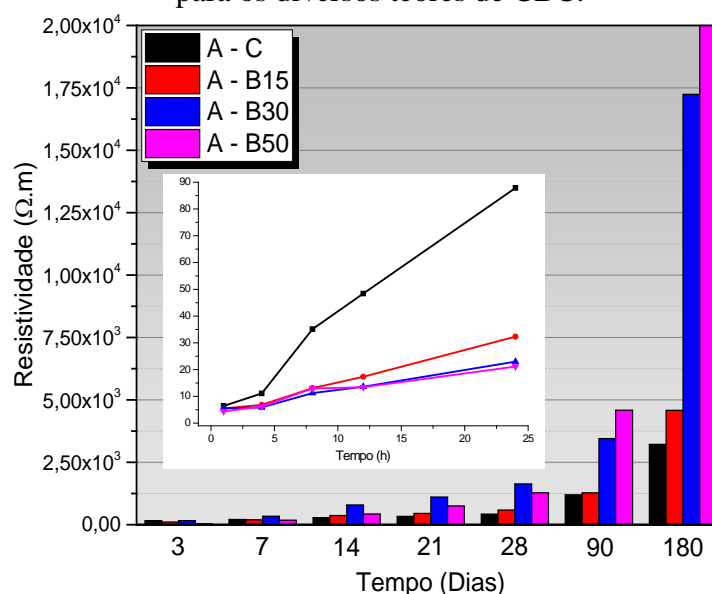
Sanish, Neithalath e Santhanam (2013) ainda salientam que o tempo médio entre 1,2 h e 12 h é correspondente ao fim de pega das pastas de cimento. Esta proposição também deixa claro que a CBC pode evidenciar um tempo maior de fim de pega, corroborando a influência da CBC na obtenção de reações de hidratação mais tardias (GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL, 2007). O mesmo efeito foi observado por Singh, Singh e Rai (2000), devido à elevada superfície específica da CBC, que retém água por adsorção.

Aos 180 dias de cura, a condutividade encontrada foi de  $3,1 \times 10^{-4}$  S/m,  $2,2 \times 10^{-4}$  S/m,  $5,8 \times 10^{-5}$  S/m e  $5,0 \times 10^{-5}$  S/m, para as misturas controle, A - B15, A – B30 e A – B50, respectivamente, o que mostra que os maiores teores de CBC evidenciam menores condutividades ao longo do tempo. Este fato ocorre porque a CBC possui capacidade de reagir com a portlandita a longo prazo, interrompendo a formação da conexão de poros; ainda é importante considerar a redução da conexão pelo ensaio de absorção capilar, o que leva a uma redução gradativa da condutividade com ao aumento da CBC.

De maneira geral, as medidas de condutividade das argamassas se mostraram na mesma ordem de grandeza das medidas de condutividade de demais argamassas e concretos, entre 0,15 e 0,80 S/m (MC CARTER, STARS e CHRISP, 2000; MANCHIRYAL e NEITHALATH, 2009; SANISH, NEITHALATH e SANTHANAM, 2013). À medida que a fração volumétrica do componente condutor no concreto é reduzida devido à adição de agregados (efeitos de diluição), espera-se uma redução nos valores de condutividade em comparação com as pastas de cimento.

A fim de corroborar os efeitos do incremento de resistividade elétrica com demais trabalhos da literatura, a Figura 7.9 abaixo mostra os resultados ao longo do tempo de cura, para os diversos teores de substituição de cimento Portland por CBC.

Figura 7.9 - Resultados de resistividade elétrica de argamassas, ao longo do tempo de cura e para os diversos teores de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As curvas de desenvolvimento de resistividade seguem uma tendência hiperbólica, e este comportamento pode ser melhor atribuído a longas idade de cura (WEI, XIAO e LI, 2012; MEDEIROS-JUNIOR e LIMA, 2016). Neste sentido, os trabalhos dizem que o modelo de regressão polinomial é o que melhor descreve os dados experimentais de resistividade elétrica ( $R_E$ ) em função do tempo de cura ( $t$ ), e este princípio também pode ser aplicado ao comportamento da evolução da Figura 7.9. Utilizando o modelo polinomial de ordem 2, os parâmetros de ajuste (A, B e C) das curvas teóricas estão listados na Tabela 7.5, de acordo com a Equação 7.8:

$$R_E = (A * t^2) + (B * t) + C \quad (7.8)$$

Tabela 7.5 – Parâmetros de ajuste logarítmico para correlação entre os dados de resistência à compressão e resistividade elétrica de argamassas.

Mistura	A	B	C	R <sup>2</sup>
A – C	7E-05	0,426	113,07	0,991
A – B15	3E-04	0,442	130,23	0,982
A – B30	7E-04	0,644	334,92	0,981
A – B50	9E-04	0,529	153,29	0,995

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Neste sentido, vê-se que os parâmetros de ajuste são maiores para as misturas com CBC, o que leva à alta evolução da resistividade elétrica das amostras ao longo do tempo. Ainda o método polinomial proporcionou os melhores coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), acima de 0,98.

A Figura 7.9 evidencia que as reações de hidratação da CBC parecem ser mais notáveis a partir dos 90 dias de cura, e este princípio é ainda mais evidente quando se incrementam altos teores de adição. Enquanto que, aos 28 dias de cura, as misturas A – B15, A – B30 e A – B50 tiveram um incremento no valor de resistividade de 39,2%, 286,3% e 202,1%, respectivamente, em relação à dosagem sem CBC, aos 180 dias as mesmas amostras tiveram um aumento de 42,3%, 435,9% e 523,1%.

Ainda aos 180 dias de cura, verifica-se que a amostra controle teve um incremento de resistividade de 2,7 vezes o valor obtido aos 90 dias de cura. Por outro lado, estes valores foram incrementados para 3,6, 5,0 e 4,4 vezes, quando se referem às misturas A – B15, A – B30 e A – B50, respectivamente.

Da mesma forma, Lubeck et al. (2012) observaram um aumento de 2,52 e 4,76 vezes na resistividade de concretos com substituição de cimento Portland por escória de alto forno, aos 7 dias de cura. Partindo para a substituição de 70% de cimento por escória, os incrementos nos valores de resistividade estiveram compreendidos entre 2,28 e 5,96 vezes. Para Arenas-Piedrahita et al. (2016), a inclusão de 10% e 20% de CBC em misturas de argamassa provocaram aumentos de mais de 2 vezes e 6 vezes nos valores de resistividade elétrica, respectivamente.

Em comparação com os resultados obtidos, um comportamento bastante similar foi identificado por Tumidajski (2005), ao se produzir argamassas com inclusão de 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland, com relação água/cimento igual a 0,5 e agregado/cimento igual a 3. Para as misturas controle, foram obtidos valores de resistividade elétrica iguais a 78, 119, 196 e 547  $\Omega\text{m}$ , a 1, 3, 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Nestas mesmas idades, as misturas com sílica ativa evidenciaram resistividades elétricas iguais a 17,

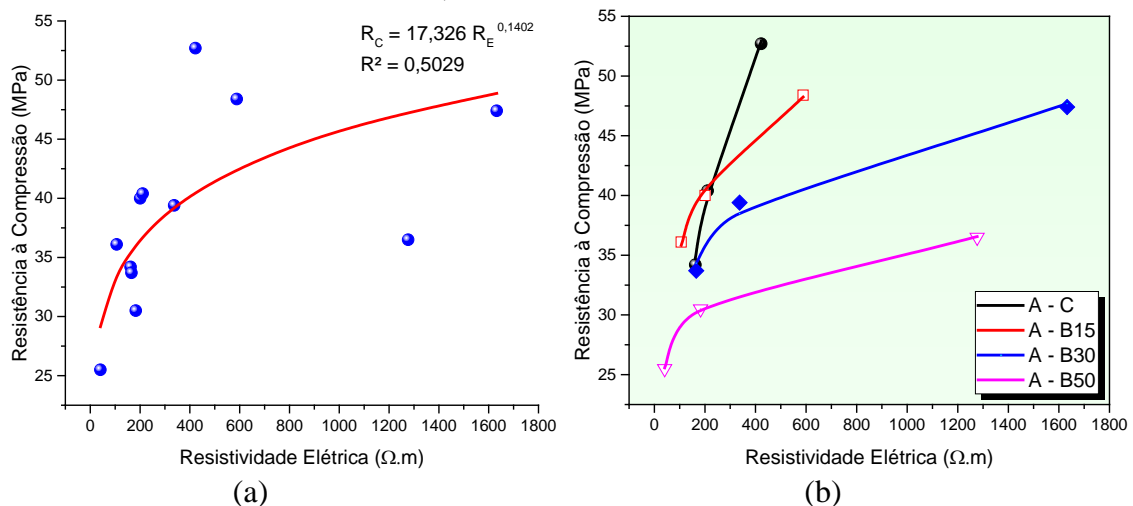


95, 558 e 1330  $\Omega\text{m}$ . Isso deixa claro que as medidas elétricas das misturas com pozolana são reduzidas nas primeiras idades, em relação às misturas controle, entretanto apresentam um comportamento oposto nas idades avançadas.

### 7.3.3 Correlação entre Resistência à Compressão e Resistividade Elétrica

Diante do comportamento obtido nos ensaios de resistividade elétrica, verifica-se que a microestrutura da matriz cimentícia é alterada durante o processo de hidratação das argamassas de cimento controle e com adição de CBC. Neste sentido, a Figura 7.10 mostra a correlação entre os valores de resistividade elétrica e resistência à compressão dos corpos de prova, correspondente aos 3, 7 e 28 dias de cura e levando-se em consideração os diversos teores de CBC nas misturas.

Figura 7.10 – Correlação entre Resistência à Compressão e Resistividade Elétrica para argamassas de cimento Portland, em função do teor de substituição de cimento por CBC, para 3, 7 e 28 dias de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

É visto que, enquanto a resistência mecânica aumenta, os valores de resistividade elétrica também aumentam correspondentemente. Isso mostra que a possível densificação das amostras como resposta aos produtos de reação formados reflete nas propriedades mecânicas e elétricas das matrizes cimentícias ao mesmo tempo, e que esta condição também é válida para as matrizes constituídas de CBC.

A Figura 7.10 (a) mostra que a correlação geral dos dados é baixa, com coeficiente de determinação igual a 0,5, mas que segue uma tendência por meio do modelo potencial para descrever o comportamento dos dados experimentais.

Por outro lado, um refinamento dos dados é observado ao se traçar as curvas teóricas para cada porcentagem de CBC incorporada nas misturas. Neste caso, o modelo que melhor descreve os dados experimentais é o logarítmico, sendo que os parâmetros de ajuste (A e B) das curvas teóricas estão listados na Tabela 7.6, de acordo com a Equação 7,9:

$$R_C = A \cdot \ln(R_E) + B \quad (7.9)$$

Tabela 7.6 – Parâmetros de ajuste logarítmico para correlação entre os dados de resistência à compressão e resistividade elétrica de argamassas.

Mistura	A	B	R <sup>2</sup>
A – C	18,975	-61,829	0,995
A – B15	7,258	1,954	0,996
A – B30	5,837	4,506	0,986
A – B50	3,189	13,750	0,999

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados acima mostram que as linhas de tendência utilizadas para ajustar os dados experimentais levam à significativa correlação entre a resistência mecânica frente à resistividade elétrica de argamassas sem e com adição de CBC. Valores de R<sup>2</sup> acima de 0,986 foram obtidos, além de que os modelos potencial, linear e logarítmico são os mais comuns na correlação destes parâmetros.

Na Figura 7.10 (b), observa-se que a taxa de crescimento (inclinação da curva) é muito mais evidente para a mistura controle, demonstrando que o ganho de resistividade elétrica e resistência à compressão está compreendido em um menor tempo de cura; isso mostra que as reações de hidratação do cimento Portland são mais aceleradas. Ao contrário, a taxa de inclinação das curvas que representam as argamassas com CBC é menor, indicando que o ganho de resistividade exerce maior efeito em relação ao ganho da resistência mecânica; essa evolução parece proporcional ao teor de CBC, mostrando inclinações menores para os maiores teores.

O modelo logarítmico ainda pode mostrar que o ganho de resistência mecânica e resistividade elétrica tiveram maior proporcionalidade aos 3 e 7 dias de cura. Ao mesmo tempo, quando se analisa a mistura controle, observa-se que a curva apresentou um comportamento quase que linear, o que corrobora os efeitos analisados por Lubeck et al. (2012); neste caso, os autores salientam que as duas propriedades são diretamente dependentes da porosidade da matriz cimentícia.

Esta diferença de comportamento pela inclusão da CBC pode levar à conclusão de que a adição mineral pode mudar o comportamento de densificação da matriz ao longo do tempo. Neste sentido, é de suma importância incluir os efeitos químicos, que estão relacionados com a concentração de íons na solução dos poros e a formação de produtos de reação adicionais durante as reações pozolânicas, bem como os efeitos físicos, que compreendem os tipos, quantidade, tamanho e distribuição dos compostos na matriz de cimento.

O mesmo comportamento foi obtido por Arenas-Piedrahita et al. (2016), em que maiores porcentagens de CBC remeteu à menor inclinação das curvas. Este comportamento também foi verificado por Dong et al. (2016) em pastas de cimento, obtendo-se uma correlação linear entre os dados de resistência à compressão e resistividade elétrica; neste caso, a menor declividade das curvas esteve associada à relação água/material cimentante baixa (0,25). Wei, Xiao e Li (2012) também obteve uma correlação linear entre os dados de resistência à compressão e resistividade elétrica de pastas de cimento Portland, ao passo que o modelo potencial descreveu melhor o comportamento das propriedades para concretos constituídos de cinza da casca de arroz (HOPPE, 2005).

De modo geral, verifica-se que a resistência à compressão de argamassas sem e com adição de CBC pode ser prevista pela curva de resistividade elétrica até os 28 dias de cura. Além disso, as misturas A – B15 e A – B30 evidenciaram as melhores propriedades mecânicas correlacionadas com as propriedades elétricas. A longas idades de cura, a resistência mecânica dessas argamassas pode equiparar-se às misturas controle, e isso remete a um possível incremento do grau de densificação das matrizes constituídas de CBC.

#### **7.4 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA (EIE)**

Nos últimos anos, as técnicas não destrutivas de Espectroscopia de Impedância também têm sido bastante difundidas para avaliar a microestrutura de pastas, argamassas e concretos. Trata-se de uma grande vantagem ao se utilizar tais medidas, principalmente para a avaliação do processo de hidratação do cimento Portland ao longo do tempo.

Utilizando-se o mesmo aparato experimental para produção dos corpos de prova de argamassa, a técnica de espectroscopia de impedância foi analisada por meio do estímulo elétrico aplicado entre as duas placas condutoras planas e paralelas, nas quais a argamassa (material dielétrico), conjuntamente com as malhas metálicas formaram o capacitor.

Levando-se em conta a inserção de CBC nos processos de hidratação a curtas e longas idades, as medidas de capacitância foram conduzidas nas primeiras 24 horas com intervalos de 1 hora. Das 24 horas às 36 horas de cura, os dados foram coletados de 2 em 2 horas. Medidas

diárias foram feitas a partir do 4º dia de cura até os 28 dias, seguido do registro dos dados de capacitância aos 90 de 180 dias de cura.

#### 7.4.1 Conceitos de Impedância no plano complexo, funções dielétricas e espectros

Em um circuito *ac* a fonte de tensão e a corrente são alternadas; isto é, variam de acordo com uma função periódica. Uma tensão alternada pode ser definida como:

$$v = V \cos(\omega t) \quad (7.10)$$

Onde  $v$  é a voltagem instantânea,  $V$  é a amplitude da voltagem (voltagem máxima) e  $\omega$  é a frequência angular.

Analogamente, uma corrente alternada, que surge como resposta, é dada por:

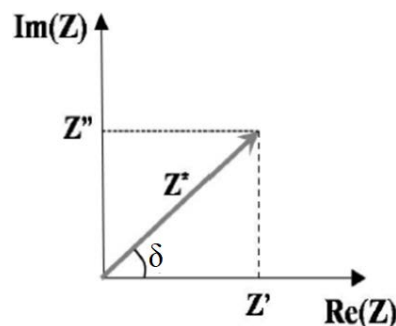
$$i = I \cos(\omega t) \quad (7.11)$$

Onde  $i$  é a corrente instantânea e  $I$  é a amplitude da corrente (corrente máxima).

A impedância de um sistema é definida como a ação conjunta de resistências e reatâncias (CHINAGLIA, 2009), ou seja, a oposição à passagem de corrente alternada que o material oferece.

Em uma representação do vetor impedância no plano complexo, os vetores paralelos ao eixo  $x$  são as componentes reais e os vetores paralelos ao eixo  $y$  são as componentes imaginárias. Neste sentido, a Figura 7.11 ilustra o vetor impedância complexa,  $Z^*$ .

Figura 7.11 - Representação da impedância complexa no plano imaginário.



Fonte: Rebeque (2011).

Sendo assim, a impedância complexa é definida como:

$$Z^* = Z' - jZ'' , \text{ onde} \quad (7.12)$$

$$Z' = Z \cos(\delta) \quad (7.13)$$

$$Z'' = Z \text{ sen}(\delta) \quad (7.14)$$

Com as componentes reais e imaginárias da impedância, também é possível obter o módulo de impedância, dado pela equação:

$$|Z^*| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (7.15)$$

O ângulo que separa as componentes é denominado ângulo de fase ( $\delta$ ). A tangente do ângulo de fase pode ser calculada pela razão entre as componentes imaginária e real da impedância complexa, isto é:

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (7.16)$$

Na impedância, as partes responsáveis pelo armazenamento de energia (reatâncias) estão separadas do termo responsável pela dissipação de energia (resistências). Sendo assim, a parte real  $Z'$  está relacionada a efeitos puramente resistivos (dissipação de energia), enquanto que a parte imaginária  $Z''$  está relacionada a efeitos puramente capacitivos (armazenamento de energia).

As componentes  $Z'$  e  $Z''$  podem ser definidas por:

$$Z' = R \quad (7.17)$$

$$Z'' = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{2\pi f C} \quad (7.18)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular,  $f$  é a frequência de oscilação do campo elétrico,  $C$  é a capacitância e  $R$  a resistência do sistema.

Sendo  $C$  definida, para o caso de capacitor de placas paralelas, tem-se que:

$$C = \frac{A \cdot \epsilon}{d} \quad (7.19)$$

Nas quais  $A$  representa a área de uma das placas,  $d$  a distância entre as placas e  $\epsilon$  a permissividade elétrica do material.

A permissividade dielétrica pode ser definida como:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} \quad (7.20)$$

Onde  $C$  é a capacitância para um capacitor preenchido com o dielétrico e  $C_0$  é a capacitância para o capacitor no vácuo.

Sendo assim, a permissividade complexa é expressa pela relação:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{1}{j\omega C_0 Z^*} \quad (7.21)$$

Nas quais  $\varepsilon'$  é a componente real da permissividade, também chamada de permissividade relativa, e que representa uma medida de polarizabilidade do material através do campo elétrico aplicado, estando relacionado com a capacidade de armazenar energia.  $\varepsilon''$  é a componente imaginária, que está relacionada ao fator de perda ou dissipação.

Substituindo a expressão 7.12 na equação da permissividade complexa, obtém-se os valores de  $\varepsilon'$  e  $\varepsilon''$  em função das componentes real e imaginária da impedância:

$$\varepsilon' = \frac{d}{A \omega \varepsilon_0} \frac{-Z''}{(Z'{}^2 + Z''{}^2)} \quad (7.22)$$

$$\varepsilon'' = \frac{d}{A \omega \varepsilon_0} \frac{Z'}{(Z'{}^2 + Z''{}^2)} \quad (7.23)$$

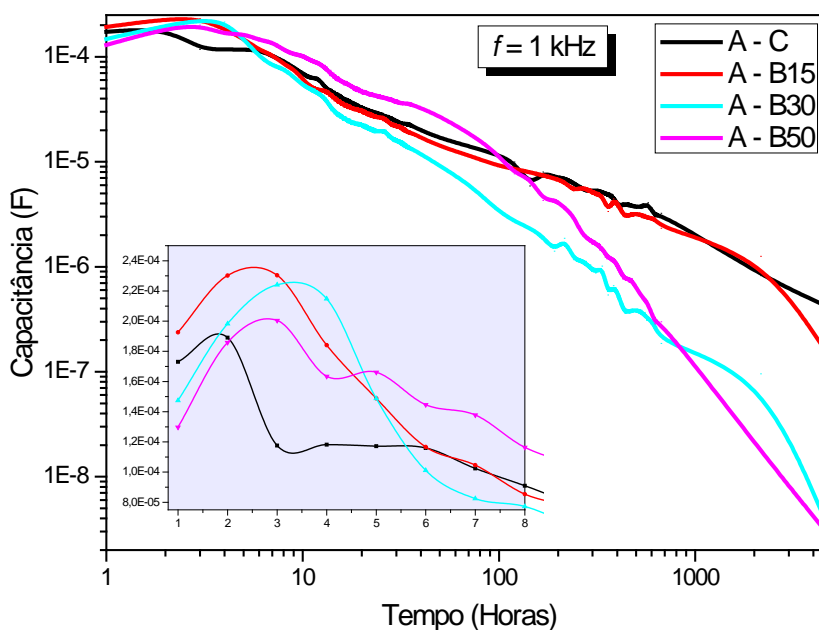
A razão dada pela tangente do ângulo de fase ( $\delta$ ), conforme Equação 7.24, dá origem ao ângulo  $\phi$  denominado ângulo de perda. Este ângulo é definido de modo que sua tangente representa a razão entre a parte real e imaginária da impedância complexa, dando origem ao fator de perda dielétrica  $D$ , isto é:

$$D = \tan(\phi) = \left( \frac{Z'}{Z''} \right) = \frac{1}{\tan(\delta)} \quad (7.24)$$

#### 7.4.2 Resultados das medidas de Capacitância

O comportamento da capacitância em função do tempo é mostrado na Figura 7.12, para a frequência fixada em 1 kHz.

Figura 7.12 – Curva de Capacitância em função do tempo de hidratação de argamassas com diversos consumos de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo Gu et al. (1993) e Neville (2016), a capacitância do concreto diminui com a idade de cura e com o aumento da frequência. Mehta e Monteiro (2008) ainda mencionam que a capacitância das matrizes de concreto é muito pequena (da ordem de até  $10^{-11}$  F), e que os efeitos da condução de corrente elétrica através do concreto podem estar relacionados com os efeitos capacitivos por meio dos íons presentes na solução dos poros.

Diante desses parâmetros, as curvas experimentais obtidas evidenciam a redução gradual dos valores de capacitância com o aumento do tempo de cura das argamassas. É de se esperar, portanto, que esta redução esteja associada ao processo de hidratação das matrizes cimentícias, levando-se em conta os efeitos químicos, da formação dos silicatos de cálcio hidratados, e físicos, de preenchimento da microestrutura.

Da mesma forma que observado nos resultados de condutividade  $dc$ , as curvas traçadas para as argamassas com adição de CBC seguiram a mesma tendência em relação à mistura controle ao longo do tempo de cura. Além disso, a adição de maiores consumos de CBC (30% e 50% em relação à massa de cimento Portland) mostra que a taxa de redução da capacitância é cada vez mais expressiva a tempos elevados de cura, em particular após as 100 horas de hidratação. Essa mudança de comportamento também foi evidenciada nas medidas de condutividade, o que pode condizer com as reações pozolânicas mais tardias da CBC, que tendem a consumir o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento por um

período mais longo, produzindo uma quantidade mais expressiva de géis de C-S-H e o consequente refinamento dos poros da matriz e diminuição da capilaridade.

A ampliação da Figura 7.12 caracteriza o incremento dos valores de capacitância nas primeiras horas de hidratação, no qual as amostras com CBC apresentaram maiores valores em relação à amostra controle.

Observou-se também uma redução gradativa da capacitância com o aumento do teor de CBC, bem como um deslocamento do pico máximo para maiores valores de tempo, comparativamente à amostra controle.

O processo de dissolução dos íons  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $OH^-$  no dielétrico pode ser identificado até 2 horas de cura para a mistura controle (A – C), enquanto que as misturas com CBC proporcionaram este efeito até 3,5 horas de cura. Neste sentido, percebe-se uma menor perda de mobilidade iônica das misturas com CBC e maior quantidade de água disponível para a reação nas primeiras horas, resultado em maiores valores de capacitância em relação à mistura controle até 3,5 horas de cura.

A menor capacitância das amostras com 30% e 50% de CBC, comparativamente à amostra com 15% de CBC, está relacionada à maior condutividade apresentada por tais amostras nas primeiras horas de cura, como mostrado na Figura 7.8.

Tais fatos podem indicar que o mecanismo de indução foi influenciado pela inserção de CBC, o que é demonstrado nas medidas de capacitância, com retardamento do final do período detectado em 3 horas para a mistura controle, e de 4 a 6 horas para as misturas com adição, dependendo do teor de CBC.

Das 6 horas em diante, é visto um processo de retardamento da redução dos valores de capacitância com a introdução de CBC, associado ao atraso para o início do estágio de aceleração (SANISH, NEITHALATH e SANTHANAM, 2013).

E diante dos estágios de desaceleração e estabilidade, existe uma inversão dos valores de capacitância para as amostras com 30% e 50% de CBC em relação à massa de cimento Portland, o que pode ter sido novamente ocasionada pela densificação dessas amostras, em consonância com o processo de hidratação mais tardio e consequente redução dos poros das matrizes.

As discussões abordadas também levam à conclusão de que as medidas obtidas pelo Método de Duas Pontas - tensão  $\times$  corrente (MDP) proporcionam resultados coerentes aos obtidos pela Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE).



### 7.4.3 Diagramas de Nyquist

A influência da inserção da CBC nas misturas de argamassas também será avaliada por meio das curvas de Nyquist, conforme mostra a Figura 7.13. Os valores de impedância real  $Z'$  e imaginária  $Z''$  são plotados em função do teor de CBC nas misturas e tempo de cura.

Figura 7.13 – Curvas de Nyquist para argamassas de cimento Portland, em função da porcentagem de CBC.

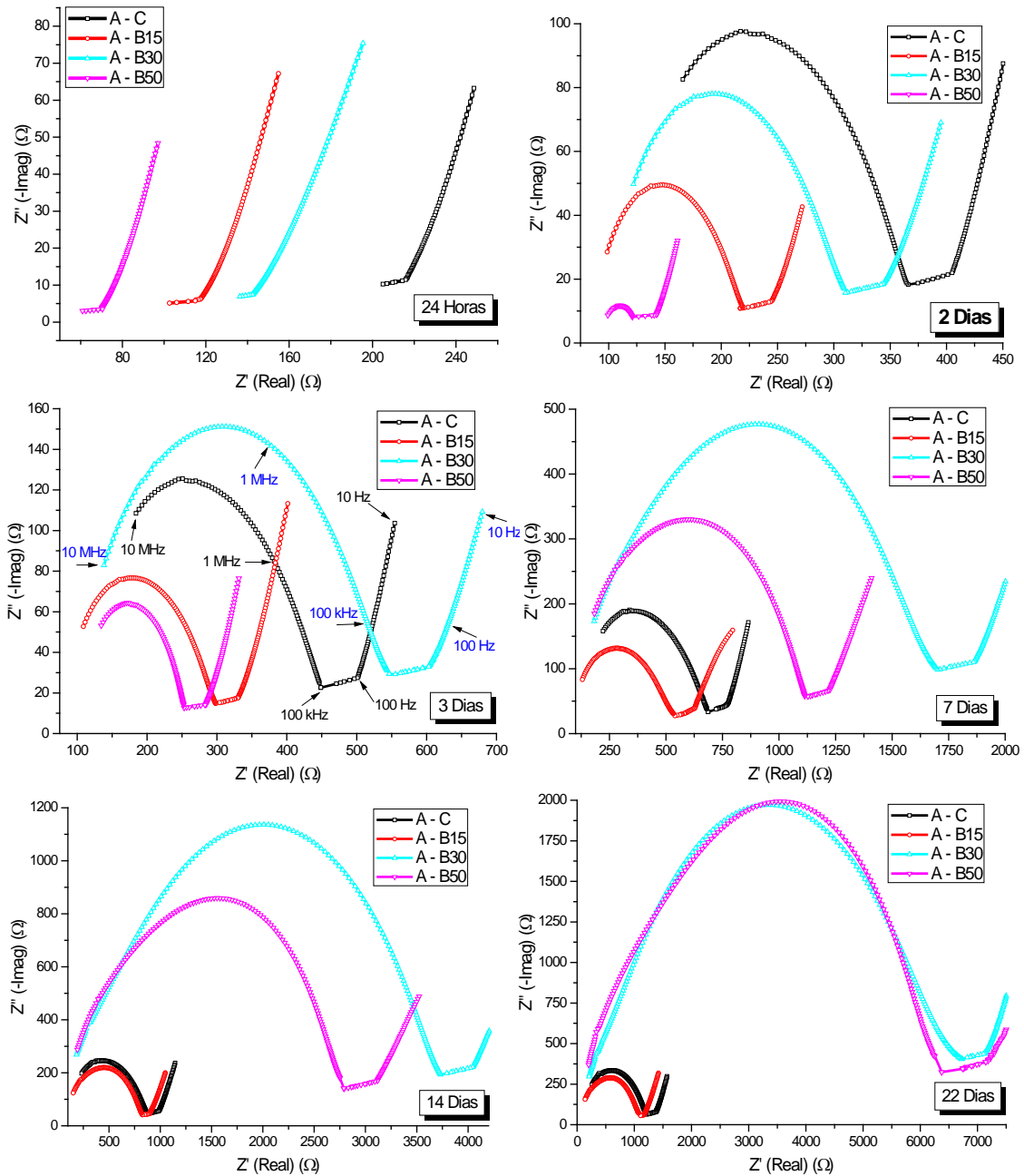
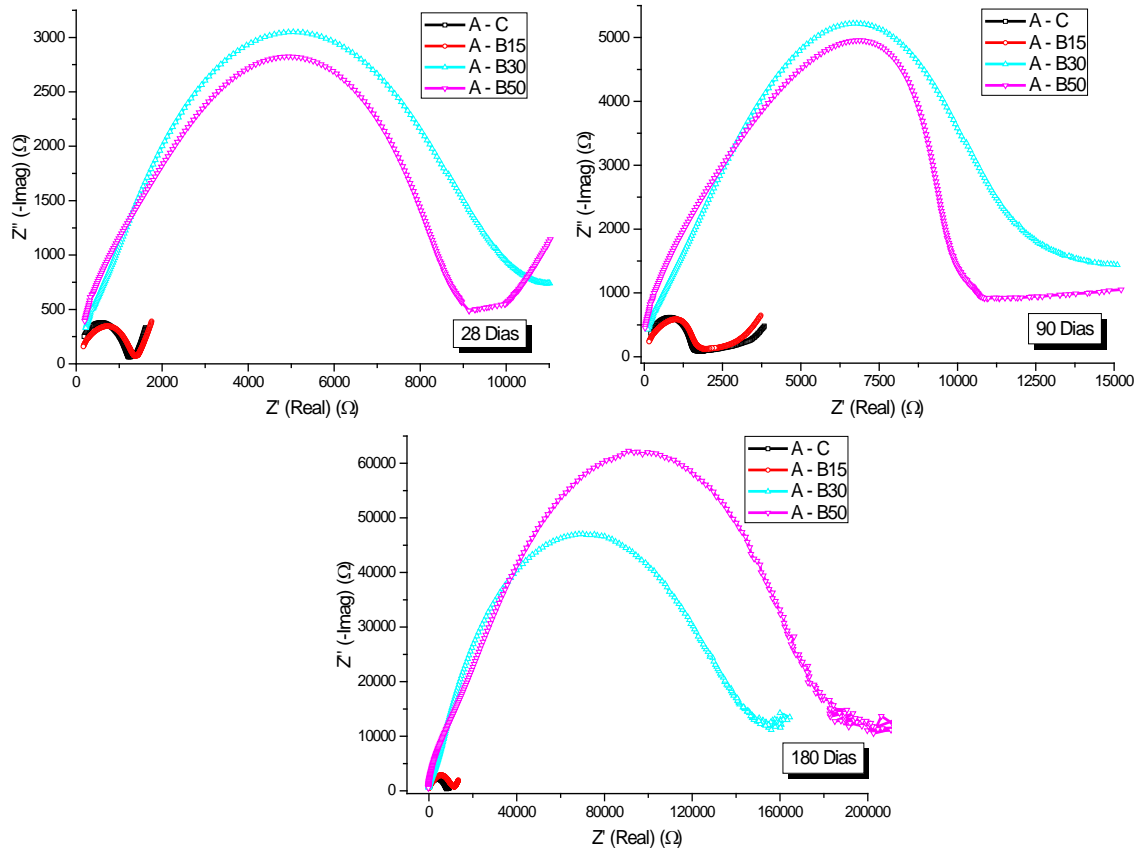


Figura 7.13 (Continuação) – Curvas de Nyquist para argamassas de cimento Portland, em função da porcentagem de CBC



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo Dotelli e Mari (2001), no espectro de impedância típico de materiais cimentícios, verifica-se a formação de um arco, cujo diâmetro aumenta com o aumento da idade de cura das pastas. Além disso, a cura faz com que a água livre presente nos poros das argamassas seja consumida pelas reações de hidratação do cimento, dificultando a passagem da corrente elétrica através da amostra, resultando no aumento da resistência elétrica (VENANCIO, 2012).

A primeira curva de Nyquist (às 24 horas de cura) foi plotada para mostrar que os espectros apresentaram o mesmo comportamento desde a primeira hora até esse tempo de hidratação. Nessas idades, percebe-se que existe apenas um arco nas regiões de baixa frequência, que caracterizam os efeitos do eletrodo em função da alta fluidez das misturas (MANCHIRYAL e NEITHALATH, 2009). De fato, assim que a água entra em contato com o grão de cimento, a taxa inicial da reação de hidratação é difícil de ser detectada em regimes de alta frequência (HUSAIN et al., 2017).

Da mesma forma, é observado que, às 24 horas de cura, a mistura A – C apresenta maior resistência elétrica que as demais misturas com CBC; um efeito bastante similar foi observado por Husain et al. (2017), em pastas de cimento Portland com adição de cinza vulcânica.

Entretanto, é nítida a presença de dois arcos no espectro a partir dos 2 dias de cura; de fato, este comportamento parece ser bastante evidente nos métodos de contato, nas quais os arcos formados na região de menor frequência estão relacionados com os efeitos de eletrodo (SUN et al., 2017). Por outro lado, os arcos de maior frequência (100 kHz a 10 MHz) estão relacionados com os efeitos da pasta (dielétrico), indicando a formação dos produtos sólidos de hidratação nas matrizes cimentícias (MANCHIRYAL e NEITHALATH, 2009).

Pode-se perceber que, com o progresso de hidratação das argamassas, em particular até os 3 dias de cura, o diâmetro dos arcos de Nyquist da região de alta frequência incrementaram, indicando o consumo da solução iônica dos poros e o conseqüente aumento nos valores de resistência elétrica e início da formação da microestrutura. Por outro lado, os incrementos das curvaturas a longo prazo levam à obtenção de uma matriz mais densa, aliado ao aumento dos géis de C-S-H e redução da conectividade dos poros.

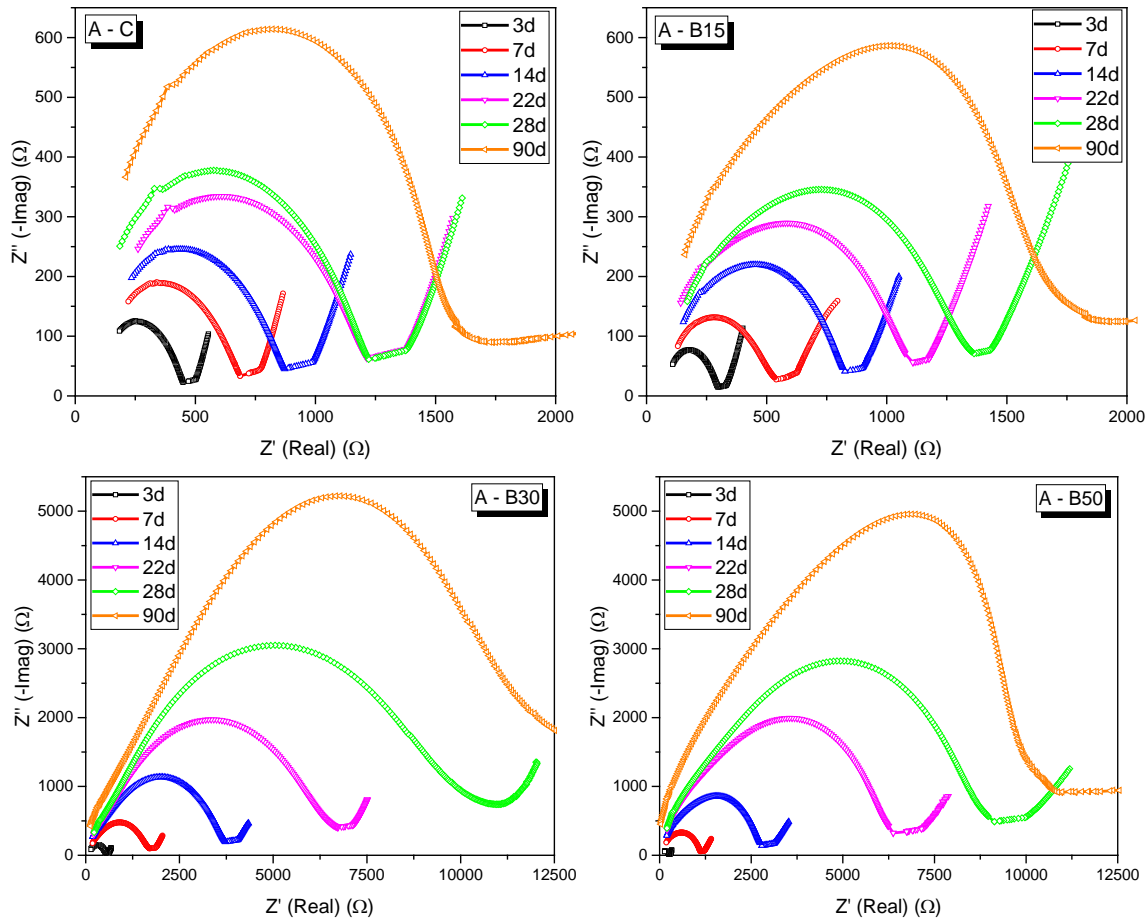
A adição de CBC em argamassas de cimento Portland pode alterar significativamente as propriedades de impedância elétrica. Os maiores teores de CBC evidenciaram arcos de diâmetros muito elevados à longas idades de cura, e a assimetria desses arcos se mostrou mais evidente em relação às misturas controle.

Embora o diâmetro dos arcos aumente para todas as misturas ao longo do tempo de cura, observa-se que a mistura controle apresenta a curvatura acima dos arcos das misturas com inclusão de CBC, aos 2 dias de cura.

Por outro lado, dos 2 para os 14 dias de cura, infere-se que arcos característicos das misturas com CBC tendem a ultrapassar os arcos das misturas controle, evidenciando um grande crescimento do diâmetro desses a partir dos 14 dias. Isso pode ser explicado pelo fato de que a CBC tende a garantir uma possível densificação da matriz a longo prazo.

A influência do tempo de cura em cada amostra de argamassa está representada pela Figura 7.14.

Figura 7.14 – Curvas de Nyquist para argamassas de cimento Portland e CBC, em função do tempo de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Comparando-se as misturas A – C e A – B15, observa-se a influência dos maiores diâmetros dos arcos até os 14 dias de cura para a mistura controle; em contrapartida, a taxa de crescimento para a mistura A – B15 é mais gradual até os 90 dias de cura, corroborando os efeitos de redução de capacitância e aumento de resistência a longas idades.

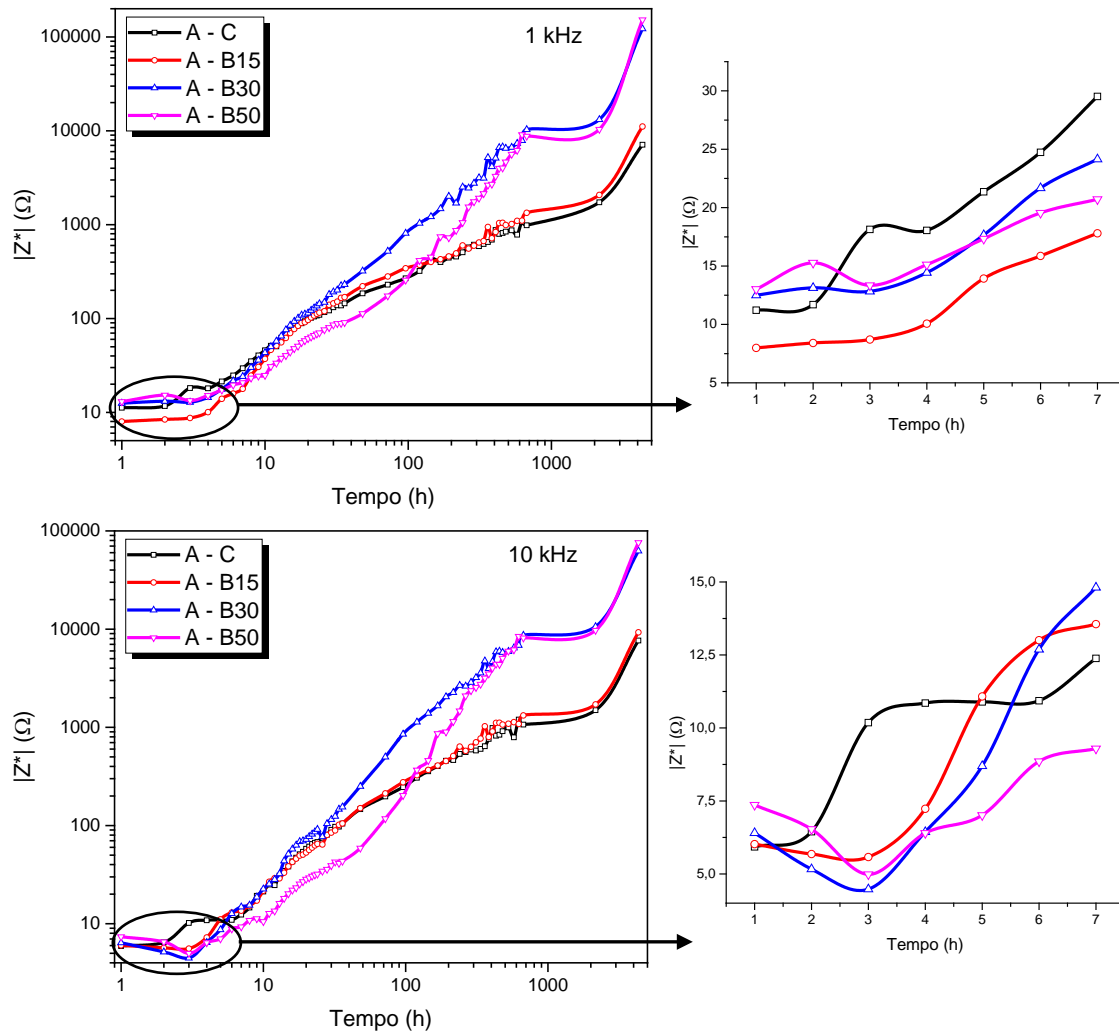
Este comportamento parece estar de acordo com as reações mais precoces do cimento Portland em relação às reações pozolânicas proporcionadas pela CBC, em que estas são promovidas pelo incremento de sítios de nucleação nas primeiras idades a reações com o hidróxido cálcico a longo prazo.

#### 7.4.4 Módulo de Impedância $|Z^*|$

O módulo de impedância também tem sido uma ferramenta científica interessante para avaliar o processo de hidratação dos compósitos à base de cimento Portland. A partir dos dados de impedância real  $Z'$  e imaginária  $Z''$ , pretende-se correlacionar os efeitos causados pela

inserção de CBC no módulo de impedância ao longo do tempo de cura. Estes resultados são apresentados na Figura 7.15, para a frequência fixada em 1 e 10 kHz.

Figura 7.15 – Módulo de Impedância para argamassas de cimento Portland, em função do tempo de cura e porcentagem de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O desenvolvimento do módulo de impedância é bastante nítido com o tempo de hidratação das argamassas. Isso mostra que mais produtos de hidratação são formados nas matrizes cimentícias. Tang, Li e Shao (2014) mencionam que a evolução do módulo de impedância está principalmente relacionada com a estrutura dos poros da pasta de cimento, no que se refere à porosidade, distribuição do tamanho e grau de tortuosidade.

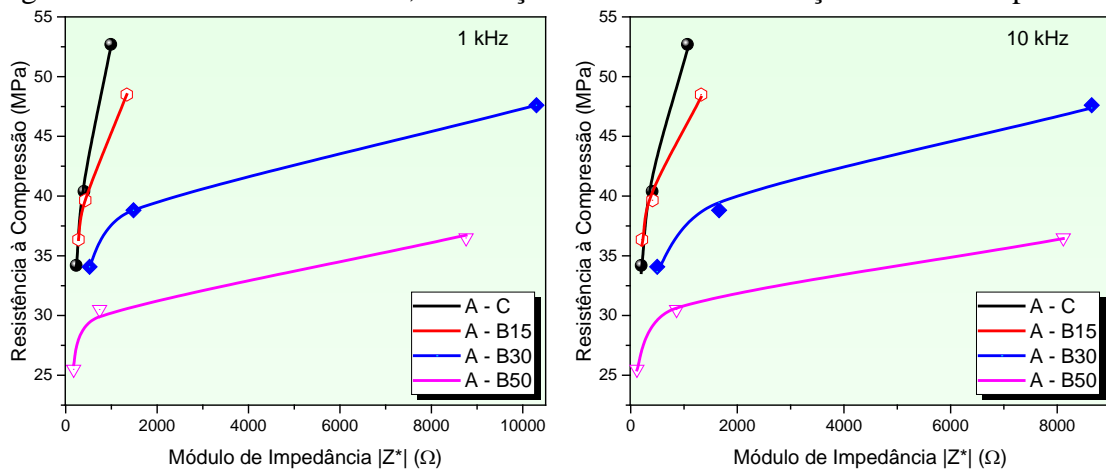
Os efeitos das reações pozolânicas proporcionadas pela inclusão de CBC nas misturas de argamassas foram bem caracterizados nas primeiras horas de hidratação, bem como nos dias mais avançados de cura.

De modo geral, os diversos patamares observados nas ampliações das curvas também podem levar à correlação das medidas de módulo de impedância com o fluxo de calor do mecanismo de hidratação do cimento.

#### 7.4.5 Correlação entre Resistência à Compressão e Módulo de Impedância Elétrica

Em resposta ao comportamento obtido nas medidas de impedância elétrica, pretende-se mostrar a correlação entre os valores de Resistência à Compressão e Módulo de Impedância, aos 3, 7 e 28 dias de cura e levando-se em consideração os diversos teores de CBC nas misturas (Figura 7.16).

Figura 7.16 – Correlação entre Resistência à Compressão e Módulo de Impedância para argamassas de cimento Portland, em função do teor de substituição de cimento por CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como observado na correlação entre os valores de resistência mecânica e resistividade elétrica, o modelo que melhor descreve os dados experimentais é o logarítmico, sendo que os parâmetros de ajuste (A e B) das curvas teóricas estão listados na Tabela 7.7, de acordo com a Equação 7.25:

$$R_C = A \cdot \ln(|Z^*|) + B \quad (7.25)$$

Tabela 7.7 – Parâmetros de ajuste logarítmico para correlação entre os dados de Resistência à Compressão e Módulo de Impedância de argamassas.

Mistura	$f = 1 \text{ kHz}$			$f = 10 \text{ kHz}$		
	A	B	R <sup>2</sup>	A	B	R <sup>2</sup>
A – C	12,764	-35,511	0,997	11,090	-25,052	0,991
A – B15	7,780	-7,495	0,998	6,776	-0,407	0,998
A – B30	4,533	5,722	0,995	4,804	3,836	1,000
A – B50	2,767	11,604	0,991	2,599	13,056	1,000

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados acima mostram que as linhas de tendência utilizadas para ajustar os dados experimentais conduzem à ótima correlação. Valores de R<sup>2</sup> acima de 0,991 foram obtidos; isso mostra que o modelo experimental aplicado proporciona valores de impedância elétrica que podem refletir no processo de formação da microestrutura interna e o desenvolvimento da resistência mecânica de argamassas até os 28 dias de cura.

O comportamento mais verticalizado das curvas das argamassas controle parecem condizer com a reações de hidratação do cimento Portland a curtas idades. Por outro lado, verifica-se a influência das reações pozolânicas da CBC a longo prazo quando se detecta o comportamento mais horizontalizado das curvas.

## 7.5 CONCLUSÕES

Em relação aos resultados obtidos sobre a influência da CBC nas propriedades mecânicas e elétricas de argamassas à base de cimento Portland, pode se levar em conta as seguintes conclusões:

- Até os 28 dias de cura, existe a viabilidade em se trabalhar com misturas de argamassa que contenham até 30% de CBC em relação à massa de cimento Portland, demonstrando a atuação da CBC como material pozolânico.
- A utilização de CBC em argamassas proporcionou reduções da absorção de água de água por capilaridade, que podem estar atribuídos à atividade pozolânica da cinza, ao refinamento e interconectividade da estrutura de poros.
- Os resultados de condutividade elétrica *dc* mostraram a influência da inserção de CBC nos mecanismos de hidratação das matrizes, provocando o aumento dos valores de condutividade nos primeiros dias de cura, em relação às misturas controle. Por outro lado, este comportamento foi invertido após períodos mais longos de cura.

- A partir das medidas de capacitância, foram obtidos espectros de impedância típicos dos materiais cimentícios, nas quais foram constatadas alterações nos diâmetros dos gráficos de Nyquist, e que refletem o progresso de hidratação das argamassas.



## Parte 4

### *O Coeficiente $k$ de Eficácia Cimentante da CBC por meio da produção de Microconcretos e em termos de Resistência Mecânica à Compressão x Relação Água/Cimento*

Considerando que o estudo da eficácia cimentante da cinza do bagaço de cana-de-açúcar se dará em termos de resistência mecânica à compressão, inicialmente serão explorados os resultados desta propriedade por meio do estudo de dosagens racionais, levando-se em conta as variáveis como: porcentagem de substituição de cimento Portland por CBC, relação agregados/materiais cimentícios (agr/cm), relação água/material cimentício (a/cm) e tempo de cura das amostras.

#### **8.1 DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MICROCONCRETOS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO (A/CM)**

##### **8.1.1 Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Microconcretos**

Inúmeros trabalhos têm mostrado que os materiais pozolânicos tem proporcionado melhorias nas características de pastas, argamassas e concretos, quando adicionadas ou substituídas por cimento Portland (MARTÍNEZ-VELANDIA, 2006). Sendo assim, a avaliação da resistência mecânica é um dos parâmetros fundamentais como justificativa para definir as dosagens das misturas constituídas de adições minerais e/ou materiais pozolânicos, sendo um dos parâmetros necessários para a obtenção do fator  $k$  de eficácia cimentante (VALENTE et al., 2010).

Neste sentido, para avaliação da resistência à compressão de microconcretos constituídos de CBC, levou-se em conta a utilização do método de dosagem IPT/EPUSP Helene & Terzian e Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho – Vitervo O’Reilly Díaz.

O método de dosagem IPT/EPUSP Helene & Terzian tem como princípio a elaboração de três traços de concreto, com as proporções entre aglomerantes e agregados secos, em massa: 1:3,5 (traço rico), 1:5,0 (traço médio) e 1:6,5 (traço pobre). A partir de ábacos propostos para diversos tipos de cimentos, o método recomenda que relações água/cimento estejam compreendidas entre 0,35 e 0,70, mantendo-se a trabalhabilidade constante.

Uma das partes mais importantes deste método é a determinação do teor ideal de argamassa seca ( $\alpha$ ), identificada pela Equação 8.1. De acordo com o método IPT/EPUSP, a verificação deste teor é feita de maneira visual, de modo que se obtenha argamassas com padrão de trabalhabilidade aceitável.

$$\alpha = \frac{1+a}{1+M} \quad (8.1)$$

Sendo:

$\alpha$ : teor de argamassa seca;

$a$ : proporção de agregados miúdos na mistura;

$M$ : soma da proporção de agregados miúdos e graúdos na mistura.

Entretanto, segundo O'Reilly Díaz (1998), a forma das partículas dos agregados pode exercer maior influência na resistência e no consumo de cimento do concreto do que a composição granulométrica desses agregados. De fato, para misturas de britas com uma proporção considerável de partículas lamelares, não se pode determinar a proporção ótima de areia e da brita pelos métodos convencionais empregados habitualmente.

Neste sentido, utilizou-se o Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho – Vitervo O'Reilly Díaz para determinar a proporção ótima entre os agregados miúdos e graúdos, levando à obtenção do teor de argamassa seca ( $\alpha$ ).

Primeiramente, determina-se, pelo método experimental, a relação ótima entre agregado miúdo e graúdo através do ensaio da Massa Compactada Unitária ( $MUC_m$ ). Neste ensaio, são feitas misturas de diversas proporções em massa entre os agregados; de posse da Massa Específica das misturas e o Índice de Vazios, é encontrada a proporção de materiais que possui a maior Massa Compactada e a menor Porosidade.

Utilizando novamente o método proposto por Helene e Terzian (1992), a etapa seguinte é a obtenção do consumo de Cimento Portland, a partir das proporções definidas e caracterização dos agregados e aglomerantes/adições utilizados. Sendo assim, a Equação 8.2 define que:

$$C = \frac{1000-ar}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + \frac{a}{c}} \quad (8.2)$$

Sendo:

$ar$ : volume de ar incorporado na mistura de concreto = 15 l/m<sup>3</sup>;

$\gamma_c$ : massa específica do cimento Portland (g/cm<sup>3</sup>);

a: proporção de agregados miúdos na mistura;

$\gamma_a$ : massa específica do agregado miúdo ( $\text{g/cm}^3$ );

p: proporção de agregados graúdos na mistura;

$\gamma_p$ : massa específica do agregado graúdo ( $\text{g/cm}^3$ );

a/c: relação água/cimento.

A partir do consumo de cimento Portland obtido e proporção de materiais na mistura, conduz-se à obtenção dos consumos de agregados e água. É importante salientar que as características de proporção de substituição e massa específica da CBC foram inseridas na Equação 8.2, de tal modo a obter o consumo de pozolana nas misturas.

Os procedimentos descritos nesse método, aliados às recomendações gerais sugeridas no texto da NBR 6118 (ABNT, 2014), conduziu à utilização de uma relação água/cimento máxima de 0,65. Ao mesmo tempo, as relações a/cm puderam ser reduzidas em função do uso de aditivos superplastificantes, para manter constante a trabalhabilidade das misturas.

A partir da definição dos traços ricos, médios e pobres, atribuiu-se uma linearidade entre as demais relações cimento/agregado e água/cimento, chegando-se à obtenção de 8 misturas para cada porcentagem de substituição de cimento Portland por CBC. Sendo assim, serão avaliados os resultados de resistência mecânica à compressão de corpos de prova de microconcreto cilíndricos de dimensões 5 x 10 cm, definindo os seguintes parâmetros:

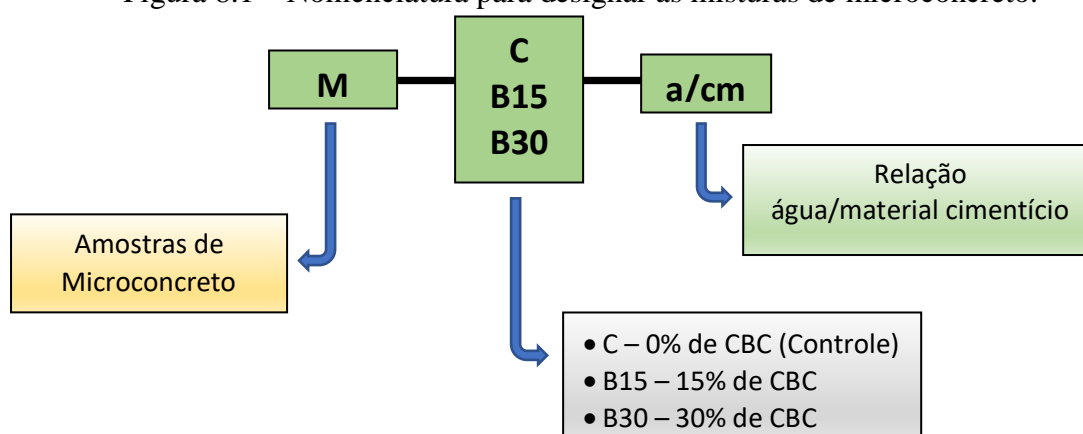
- Materiais utilizados: Aglomerante (Cimento Portland CP V-ARI), Agregados Miúdos (Areia Média Natural e Pó de Pedra), Agregado Graúdo (Brita 0), Água, Pozolana (CBC) e Aditivo Superplastificante para manter a trabalhabilidade;
- Relações agregados/material cimentício: 3,5 a 7,0;
- Relações água/material cimentante: 0,3 a 0,65;
- Microconcreto Controle (sem substituição de CBC);
- Microconcreto com substituição em massa de Cimento Portland por 15% e 30% de CBC;
- Tempos de Cura de 7, 28, 90, 180 e 365 dias.

Os procedimentos de mistura, adensamento, moldagem e cura dos corpos de prova de Microconcreto, bem como os ensaios de ruptura foram seguidos conforme os parâmetros definidos nos itens 4.2.7.1 a 4.2.7.4 da parte experimental.

Além disso, a evolução da resistência à compressão será avaliada em termos de relação água/material cimentício (a/cm), através da soma de cimento Portland + CBC.

A nomenclatura utilizada para designar as misturas se apresenta de forma:

Figura 8.1 – Nomenclatura para designar as misturas de microconcreto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As dosagens dos Microconcretos estão definidas nas Tabelas 8.1 a 8.3 abaixo.

Tabela 8.1 – Dosagens de Microconcretos para Misturas sem adição de CBC (Controle).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cimento	Areia	B 0	Pó P.	Água	CBC
M – C – 0,30	3,5	0,53	0,30	0,0	537,98	745,10	682,70	455,13	161,39	0,00
M – C – 0,35	4,0	0,53	0,35	0,0	478,89	790,17	675,23	450,15	167,61	0,00
M – C – 0,40	4,5	0,53	0,40	0,0	431,49	826,31	669,25	446,16	172,60	0,00
M – C – 0,45	5,0	0,53	0,45	0,0	392,64	855,95	664,34	442,89	176,69	0,00
M – C – 0,50	5,5	0,53	0,50	0,0	360,20	880,68	660,24	440,16	180,10	0,00
M – C – 0,55	6,0	0,53	0,55	0,0	332,71	901,65	656,77	437,85	182,99	0,00
M – C – 0,60	6,5	0,53	0,60	0,0	309,12	919,64	653,79	435,86	185,47	0,00
M – C – 0,65	7,0	0,53	0,65	0,0	288,66	935,24	651,21	434,14	187,63	0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8.2 – Dosagens de Microconcretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B15).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cimento	Areia	B 0	Pó P.	Água	CBC
M – B15 – 0,30	3,5	0,53	0,30	15,0	456,38	743,62	681,34	454,23	161,07	80,54
M – B15 – 0,35	4,0	0,53	0,35	15,0	406,34	788,77	674,04	449,36	167,32	71,71
M – B15 – 0,40	4,5	0,53	0,40	15,0	366,19	825,00	668,18	445,45	172,32	64,62
M – B15 – 0,45	5,0	0,53	0,45	15,0	333,26	854,71	663,38	442,25	176,43	58,81
M – B15 – 0,50	5,5	0,53	0,50	15,0	305,76	879,51	659,37	439,58	179,86	53,96
M – B15 – 0,55	6,0	0,53	0,55	15,0	282,46	900,54	655,97	437,31	182,77	49,85
M – B15 – 0,60	6,5	0,53	0,60	15,0	262,45	918,59	653,05	435,36	185,26	46,32
M – B15 – 0,65	7,0	0,53	0,65	15,0	245,10	934,25	650,51	433,68	187,43	43,25

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8.3 – Dosagens de Microconcretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B30).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cimento	Areia	B 0	Pó P.	Água	CBC
M – B30 – 0,30	3,5	0,53	0,30	30,0	375,10	742,15	679,99	453,33	160,76	160,76
M – B30 – 0,35	4,0	0,53	0,35	30,0	334,04	787,38	672,85	448,57	167,02	143,16
M – B30 – 0,40	4,5	0,53	0,40	30,0	301,09	823,69	667,12	444,75	172,05	129,04
M – B30 – 0,45	5,0	0,53	0,45	30,0	274,05	853,47	662,42	441,61	176,18	117,45
M – B30 – 0,50	5,5	0,53	0,50	30,0	251,47	878,35	658,49	438,99	179,62	107,77
M – B30 – 0,55	6,0	0,53	0,55	30,0	232,33	899,44	655,16	436,77	182,54	99,57
M – B30 – 0,60	6,5	0,53	0,60	30,0	215,89	917,54	652,30	434,87	185,05	92,53
M – B30 – 0,65	7,0	0,53	0,65	30,0	201,63	933,25	649,82	433,21	187,23	86,41

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Equação 8.2, fica evidente que o consumo de materiais das misturas de microconcretos é fornecido para se produzir 1000 litros de microconcreto. Isto quer dizer que, à medida em que se aumenta a relação agregado/cimento, são observadas alterações nos consumos de agregados. Entretanto, estas alterações são necessárias, pois permitem manter constante o teor de argamassa seca ( $\alpha$ ) das misturas.

Os dados evidenciam que essa constância é obtida pelo aumento nos consumos de areia média natural e reduções nos consumos de brita 0 e pó de pedra, à medida em que reduzem os consumos de cimento Portland e aumentam as relações a/cm.

### 8.1.2 Trabalhabilidade

Segundo Velázquez (2002), argamassas e concretos no estado fresco são considerados suspensões com distintos materiais em forma de partículas, que apresentam características peculiares quanto às propriedades de densidade, tamanho de partículas e composição química. Neste mesmo sentido, ao substituir o cimento Portland por um material pozolânico, este pode melhorar ou prejudicar a trabalhabilidade das misturas, a qual poderá exercer uma grande influência nas propriedades do sistema no estado endurecido.

Sendo assim, após os procedimentos de mistura, foram realizados os ensaios para medir a consistência das dosagens de microconcreto, de tal forma a avaliar as relações água/material cimentante e consumo de aditivo superplastificante para garantir a mesma consistência em todas as porcentagens de substituição de CBC. Sendo assim, foram realizados os ensaios de Mini-Abatimento (Mini-Slump) e Mesa de Consistência (Flow Table), sendo os procedimentos definidos na parte experimental (item 4.2.7.2).

A porcentagem de superplastificante foi obtida pela relação entre as massas de aditivo e cimento Portland, de tal forma a proporcionar um abatimento de  $40 \pm 10$  mm uma abertura de consistência de  $290 \pm 10$  mm.

Os resultados referentes às definições acima são mostrados na Tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Trabalhabilidade de Microconcretos para Misturas com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland.

(a) Traço Controle, com 0% de CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – C)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M – C – 0,30	0,30	0,93	51,0	300,0
M – C – 0,35	0,35	0,50	50,0	288,0
M – C – 0,40	0,40	0,37	39,0	280,0
M – C – 0,45	0,45	0,30	37,0	283,0
M – C – 0,50	0,50	0,32	37,0	290,0
M – C – 0,55	0,55	0,35	38,0	298,0
M – C – 0,60	0,60	0,27	39,0	290,0
M – C – 0,65	0,65	0,29	38,0	296,0

(b) Traço com 15% de CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B15)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M – B15 – 0,30	0,30	0,79	50,0	280,0
M – B15 – 0,35	0,35	0,71	43,0	288,0
M – B15 – 0,40	0,40	0,50	30,0	283,0
M – B15 – 0,45	0,45	0,43	35,0	285,0
M – B15 – 0,50	0,50	0,50	39,0	285,0
M – B15 – 0,55	0,55	0,39	30,0	292,0
M – B15 – 0,60	0,60	0,41	30,0	290,0
M – B15 – 0,65	0,65	0,50	33,0	295,0

(c) Traço com 30% de CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B30)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M – B30 – 0,30	0,30	1,09	51,0	282,0
M – B30 – 0,35	0,35	1,03	52,0	295,0
M – B30 – 0,40	0,40	0,81	47,0	298,0
M – B30 – 0,45	0,45	0,70	44,0	295,0
M – B30 – 0,50	0,50	0,64	40,0	293,0
M – B30 – 0,55	0,55	0,65	39,0	289,0
M – B30 – 0,60	0,60	0,63	47,0	297,0
M – B30 – 0,65	0,65	0,63	38,0	283,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em primeiro lugar, os resultados evidenciam que a relação  $a/cm$  tem forte influência na porcentagem de substituição de aditivo. Independente da porcentagem de cimento Portland substituída por CBC, as misturas revelam um incremento na porcentagem de aditivo à medida em que as relações  $a/cm$  se tornam menores.

Observa-se que os limites definidos para a Mesa de Consistência e Mini-Slump foram satisfeitos, além de que os teores de superplastificante obtidos se mostraram o suficiente para não proporcionar fenômenos de segregação e exsudação das misturas. A Figura 8.2 abaixo mostra a análise visual do comportamento das misturas referentes aos ensaios descritos.

Figura 8.2 – Ensaio de Mini-Slump (a) e Mesa de Consistência “Flow Table” (b) aplicados às misturas de Microconcretos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Entretanto, as misturas com relação  $a/cm$  alta, apesar de manterem um padrão nos valores de abertura em relação às dosagens com  $a/cm$  menores, tendem a apresentar baixos valores de Mini-Slump, caracterizados pelo incremento no consumo de agregados juntamente com a redução no consumo de cimento Portland. Ao mesmo tempo, um comportamento oposto foi observado para as misturas com relação  $a/cm$  baixa, nas quais, apesar de manterem o mesmo padrão de abertura, tenderam a apresentar altos valores de Mini-Slump. Mesmo assim, todos os valores de abatimento estão dentro dos padrões definidos.

A avaliação da trabalhabilidade de microconcretos com adição de CBC também se deu por meio da correlação entre a porcentagem de aditivo superplastificante (%Superp.) e a relação água/material cimentício, por meio da análise de regressão das curvas experimentais. Para maior precisão dos parâmetros de ajustes, o modelo que melhor descreve os dados experimentais é o Polinomial de Ordem 3, sendo que os parâmetros (A, B, C e D) das curvas teóricas estão listados na Tabela 8.5, de acordo com a Equação 8.3:

$$\% \text{ Superp.} = \left( A * a/cm^3 \right) + \left( B * a/cm^2 \right) + \left( C * a/cm \right) + D \quad (8.3)$$

Tabela 8.5 – Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Microconcretos em função da porcentagem de Superplastificante e relação a/cm.

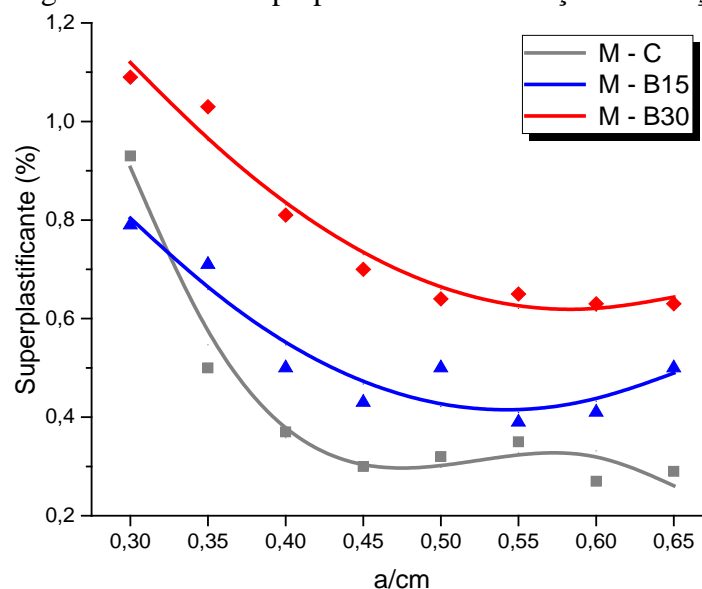
Mistura	A	B	C	D	R <sup>2</sup>
M – C	-65,657	103,200	-53,434	9,422	0,975
M – B15	0,606	5,875	-6,907	2,331	0,908
M – B30	1,616	3,935	-6,241	2,594	0,965

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao se tratar de misturas de concreto, percebe-se que diversas variáveis devem ser levadas em conta ao se avaliar a trabalhabilidade das misturas. De fato, a atribuição de diversas relações a/cm e teores de CBC levaram a alterações no consumo de cimento, agregados e água, levando a obter um ajuste nas quais o método de regressão fosse mais refinado.

As linhas de tendência utilizadas para ajustar os dados experimentais representam satisfatoriamente o comportamento dos microconcretos frente à porcentagem de superplastificante e a relação a/cm, com valores de R<sup>2</sup> acima de 0,9. Sendo assim, a influência da inserção de CBC para diversas relações a/cm e otimização da porcentagem de aditivo estão caracterizados na Figura 8.3 abaixo.

Figura 8.3 – Trabalhabilidade de Microconcretos constituídos de CBC – Influência da porcentagem de aditivo Superplastificante em função da relação a/cm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.



As curvas evidenciam que maiores porcentagens de aditivo são necessárias para manter a trabalhabilidade de microconcretos com relação a/cm menor (0,3), conduzindo a reduções do teor de superplastificante para as dosagens com a/cm médio (0,5) e a/cm alto (0,65). Ainda para esta última relação, nota-se um leve incremento no teor de aditivo, se comparado com as dosagens de fator a/cm = 0,60.

É nítido o comportamento do material pozolânico, nas quais requer uma porcentagem maior de aditivo em relação à mistura controle, sendo diretamente proporcional à porcentagem de CBC. As misturas controle e M – 15 apresentaram teores de superplastificante mais próximos entre si; em particular, o teor de aditivo se mostrou maior apenas para o traço controle com relação a/cm = 0,3, contudo este teor poderia ser reduzido satisfazendo os limites de Mini-Slump e Abertura.

Em relação às misturas M – 15 e M – 30, se observa que, para algumas relações a/cm, praticamente o dobro do teor de aditivo é necessário para manter a trabalhabilidade da mistura com maior teor de CBC.

De fato, quando se analisa a microestrutura da CBC, constata-se que suas partículas são de natureza irregular e altamente porosas; além disso, pode-se aliar tal fenômeno à maior superfície específica da adição em relação à do Cimento Portland.

Por outro lado, segundo Paiva (2016), a utilização da CBC parece ter proporcionado melhor coesão nas misturas dos concretos. Além disso, a fixação dos limites de trabalhabilidade permitiu observar que a relação superplastificante/material cimentício reduziu com o uso da CBC (CORDEIRO, 2006; GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL, 2007), ou seja, a presença de CBC nas misturas aumentou a fluidez. A redução da quantidade de superplastificante chegou a ser em torno de 20%, com o uso de até 15% de CBC nas misturas.

### **8.1.3 Resistência Mecânica à Compressão**

Os resultados de resistência à compressão (média e desvio padrão) das dosagens estudadas em função do tempo e da relação a/cm são mostrados nas Tabelas 8.6 a 8.8, para os traços Controle (M – C), 15% de CBC (M – B15) e 30% de CBC (M – B30), respectivamente.

Tabela 8.6 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Misturas sem adição de CBC (Controle).

Mistura	Ag/cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)				
			7	28	90	180	365
Resistência à Compressão (MPa)							
M – C – 0,30	3,5	0,30	53,4 ± 3,7	66,0 ± 4,3	94,5 ± 1,3	101,5 ± 4,3	109,8 ± 2,4
M – C – 0,35	4,0	0,35	48,4 ± 4,8	61,5 ± 1,8	83,8 ± 3,6	98,3 ± 3,0	99,9 ± 2,2
M – C – 0,40	4,5	0,40	35,9 ± 1,1	51,0 ± 1,4	69,2 ± 0,6	72,7 ± 2,5	76,4 ± 0,9
M – C – 0,45	5,0	0,45	33,0 ± 1,5	43,1 ± 1,2	61,4 ± 2,7	69,9 ± 1,6	68,0 ± 1,7
M – C – 0,50	5,5	0,50	30,4 ± 0,9	41,8 ± 3,3	57,0 ± 2,1	62,5 ± 1,1	62,9 ± 1,3
M – C – 0,55	6,0	0,55	27,3 ± 0,8	40,0 ± 1,7	49,6 ± 1,0	53,7 ± 0,7	55,1 ± 0,6
M – C – 0,60	6,5	0,60	27,7 ± 2,4	35,7 ± 0,4	39,1 ± 1,6	44,6 ± 1,6	43,5 ± 0,9
M – C – 0,65	7,0	0,65	26,0 ± 1,2	28,4 ± 1,4	37,5 ± 0,4	38,6 ± 5,9	39,4 ± 1,7

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8.7 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B15).

Mistura	Ag/cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)				
			7	28	90	180	365
Resistência à Compressão (MPa)							
M – B15 – 0,30	3,5	0,30	45,5 ± 0,1	60,6 ± 5,5	101,0 ± 2,5	100,1 ± 0,1	112,9 ± 6,9
M – B15 – 0,35	4,0	0,35	46,1 ± 0,6	54,7 ± 2,5	82,9 ± 2,4	88,0 ± 2,1	93,4 ± 3,8
M – B15 – 0,40	4,5	0,40	39,6 ± 2,9	53,4 ± 2,3	67,9 ± 2,6	68,3 ± 1,3	82,9 ± 2,0
M – B15 – 0,45	5,0	0,45	30,1 ± 0,7	43,8 ± 2,1	59,4 ± 2,8	63,8 ± 1,9	72,6 ± 1,4
M – B15 – 0,50	5,5	0,50	29,1 ± 1,9	38,4 ± 1,2	52,5 ± 0,7	55,2 ± 2,6	61,1 ± 0,2
M – B15 – 0,55	6,0	0,55	26,5 ± 2,5	35,1 ± 1,3	46,0 ± 0,8	48,5 ± 0,9	52,7 ± 2,5
M – B15 – 0,60	6,5	0,60	25,3 ± 2,2	29,7 ± 1,4	40,2 ± 0,8	40,9 ± 1,5	47,7 ± 0,9
M – B15 – 0,65	7,0	0,65	24,2 ± 1,0	29,8 ± 1,0	34,2 ± 0,3	37,2 ± 2,2	39,6 ± 0,6

Fonte: Elaboração do próprio autor.

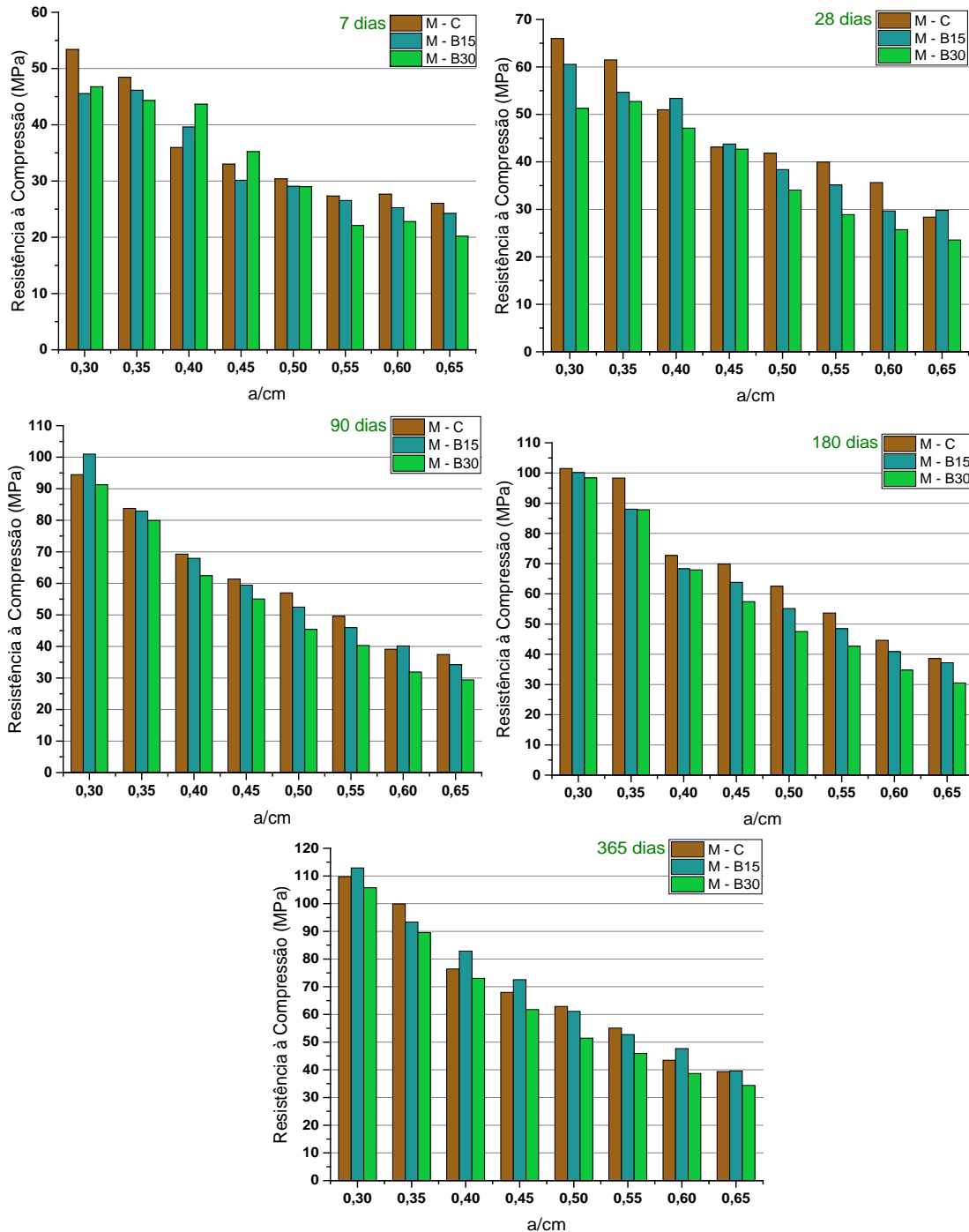
Tabela 8.8 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (M – B30).

Mistura	Ag/cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)				
			7	28	90	180	365
Resistência à Compressão (MPa)							
M – B30 – 0,30	3,5	0,30	46,8 ± 2,4	51,3 ± 0,8	91,3 ± 4,1	98,4 ± 0,5	105,7 ± 2,4
M – B30 – 0,35	4,0	0,35	44,3 ± 1,3	52,7 ± 7,3	80,0 ± 0,8	87,9 ± 2,2	89,6 ± 1,6
M – B30 – 0,40	4,5	0,40	43,7 ± 3,0	47,1 ± 2,4	62,4 ± 3,0	67,9 ± 1,1	73,0 ± 0,4
M – B30 – 0,45	5,0	0,45	35,2 ± 0,7	42,7 ± 2,0	55,1 ± 0,2	57,4 ± 0,9	61,8 ± 1,1
M – B30 – 0,50	5,5	0,50	29,0 ± 3,0	34,1 ± 1,4	45,4 ± 1,5	47,5 ± 0,7	51,4 ± 0,7
M – B30 – 0,55	6,0	0,55	22,1 ± 0,4	28,9 ± 1,0	40,3 ± 2,1	42,7 ± 0,6	45,9 ± 0,7
M – B30 – 0,60	6,5	0,60	22,8 ± 1,8	25,7 ± 1,0	31,9 ± 0,9	34,8 ± 0,2	38,7 ± 0,5
M – B30 – 0,65	7,0	0,65	20,2 ± 0,3	23,6 ± 1,4	29,4 ± 1,0	30,5 ± 0,3	35,0 ± 0,6

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A fim de avaliar o comportamento mecânico dos corpos de prova com CBC frente às misturas controle, a Figura 8.4 mostra a evolução da resistência mecânica dos diferentes teores de substituição de CBC em relação aos fatores água/material cimentante.

Figura 8.4 – Evolução da Resistência à Compressão de Microconcretos com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland, aos 7, 28, 90, 180 e 365 dias de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para todas as porcentagens de substituição de cimento por CBC (0, 15 e 30%), pode-se observar um aumento contínuo dos valores de resistência à compressão com o aumento do tempo de cura. As misturas com inclusão de CBC merecem destaque, visto que valores bastante expressivos de resistência mecânica foram obtidos, chegando a 113 MPa aos 365 dias de cura.

Assim como observado nas misturas controle, a Figura 8.4 mostra claramente que as misturas constituídas de CBC também apresentam um comportamento habitual frente à relação água/material cimentício. Conforme esperado, a resistência à compressão diminui com o incremento da relação a/cm, evidenciando a Lei de Abrams.

É de grande relevância o fato de que as dosagens empregadas mostraram claramente que o uso de 15 e 30% de CBC proporciona o alcance da resistência mínima de 20 MPa aos 28 dias de idade, prevista pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos estruturais. Ainda pode-se observar que os requisitos podem ser alcançados mesmo utilizando o maior fator água/cimento previsto pela norma, de 0,65, considerando a influência das classes de agressividade ambiental.

Na pesquisa realizada por Paiva (2016), se produziu concretos convencionais de classe C25 com adição de 15% de CBC em substituição à massa de cimento Portland. Sendo assim, as misturas apresentaram uma queda nos valores de resistência à compressão, quando comparado com o concreto de referência, em cerca de 19,8%, 12,0%, 7,6%, 5,4% e 7,2%, para as idades 7, 28, 90, 180 e 365 dias, respectivamente. Para a produção de concretos de alto desempenho (CAD), de classe C60, as reduções foram caracterizadas em 12,3%, 11,2%, 10,9%, 6,3% e 3,6%, para as mesmas idades de cura.

Ao mesmo tempo, o efeito da inserção de 15% de CBC nas matrizes de microconcretos com relação a/cm média (0,5) evidenciou a queda de 4,3%, 8,2%, 11,8% e 2,8%, para as idades de 7, 28, 90, 180 e 365 dias, respectivamente. Em comparação aos concretos de alto desempenho, as misturas de microconcreto com relação a/cm baixa (0,3) evidenciaram reduções de 14,7%, 8,2%, 6,9%, 1,4% e 2,9% para as mesmas idades de cura.

Os dados obtidos anteriormente mostram que a inserção de CBC em microconcretos tende a aproximar os valores de resistência à compressão em relação às misturas controle para idades mais tardias. Apesar dos resultados de resistência à compressão serem bastante satisfatórios logo nos primeiros dias de cura, percebe-se que as reações de hidratação são bem mais pronunciadas aos 90 dias de cura. Nesta idade, se dá a evidência de que as misturas constituídas de CBC apresentam grande parte das resistências mecânicas superiores às das misturas controle. A partir dos 90 dias, as resistências mecânicas seguem com uma taxa de crescimento pouco expressiva.

De maneira geral, a inserção de 15% de CBC em relação à massa de cimento proporciona uma maior aproximação dos valores de resistência à compressão em relação ao traço controle, se comparado com o traço com 30% de CBC. Esse comportamento deixa claro que o consumo de CBC nas misturas de microconcretos é inversamente proporcional à performance da resistência mecânica. Foram observados incrementos de até 10% nos valores de resistência mecânica para o traço M – B15 – 0,6 aos 365 dias de cura e traço M – B15 – 0,4 aos 7 dias de cura.

De maneira pontual, as misturas M – B15 – 0,4 e M – B15 – 0,45, M – B30 – 0,4 e M – B30 – 0,45 apresentam maior incremento ou proximidade nos valores de resistência à compressão em relação às misturas M – C – 0,4 e M – C – 0,45, respectivamente, para todas as idades de cura.

Por outro lado, as maiores reduções de resistência mecânica se apresentaram para os microconcretos com 30% de CBC, sendo mais significativas nas idades iniciais (até 28 dias). Para este teor de substituição, as misturas com a/cm elevado indicaram maior discrepância em relação aos valores de resistência da mistura controle para idades mais curtas, chegando a 27,8% de redução para a mistura M – B30 – 6,5, aos 28 dias de cura.

Aliado ao comportamento da CBC frente aos ensaios de caracterização da Parte 1 deste trabalho, Cordeiro e Kurtis (2017) atribuem que a reatividade pozolânica da CBC é fortemente influenciada pelo teor de silício amorfo. De fato, é verificado que, para cinzas com diversas granulometrias, a fração solúvel de silício está entre 10% e 20%, muito baixa em relação a outros materiais, como por exemplo 90% para cinza da casca de arroz.

#### 8.1.4 Coeficiente entre Resistências à Compressão de Microconcretos

Analogamente ao Índice de Atividade Resistente aplicado às misturas de argamassa, se pretende nesta seção avaliar a evolução da reatividade da CBC por meio da comparação entre as resistências das misturas com pozolana e as misturas controle, para uma mesma relação a/cm. O coeficiente é dado pela Equação 8.4 abaixo, sendo os valores discriminados nas Tabelas 8.9 e 8.10.

$$\text{Coeficiente} = \frac{R_{c_{poz.}}}{R_{c_{contr.}}} \quad (8.4)$$

Onde:

$R_{c_{poz.}}$  - Resistência à compressão da mistura de concreto com adição de pozolana.

$R_{c_{contr.}}$  - Resistência à compressão da mistura de concreto sem adição de pozolana (controle).

Tabela 8.9 - Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Microconcretos Controle e com 15% de CBC.

Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)				
		7	28	90	180	365
		Rc <sub>poz.</sub> / Rc <sub>contr.</sub>				
M – B15 – 0,30	0,30	0,85	0,92	1,07	0,99	1,03
M – B15 – 0,35	0,35	0,95	0,89	0,99	0,90	0,93
M – B15 – 0,40	0,40	1,10	1,05	0,98	0,94	1,08
M – B15 – 0,45	0,45	0,91	1,02	0,97	0,91	1,07
M – B15 – 0,50	0,50	0,96	0,92	0,92	0,88	0,97
M – B15 – 0,55	0,55	0,97	0,88	0,93	0,90	0,96
M – B15 – 0,60	0,60	0,91	0,83	1,03	0,92	1,10
M – B15 – 0,65	0,65	0,93	1,05	0,91	0,96	1,01

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8.10 - Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Microconcretos Controle e com 30% de CBC.

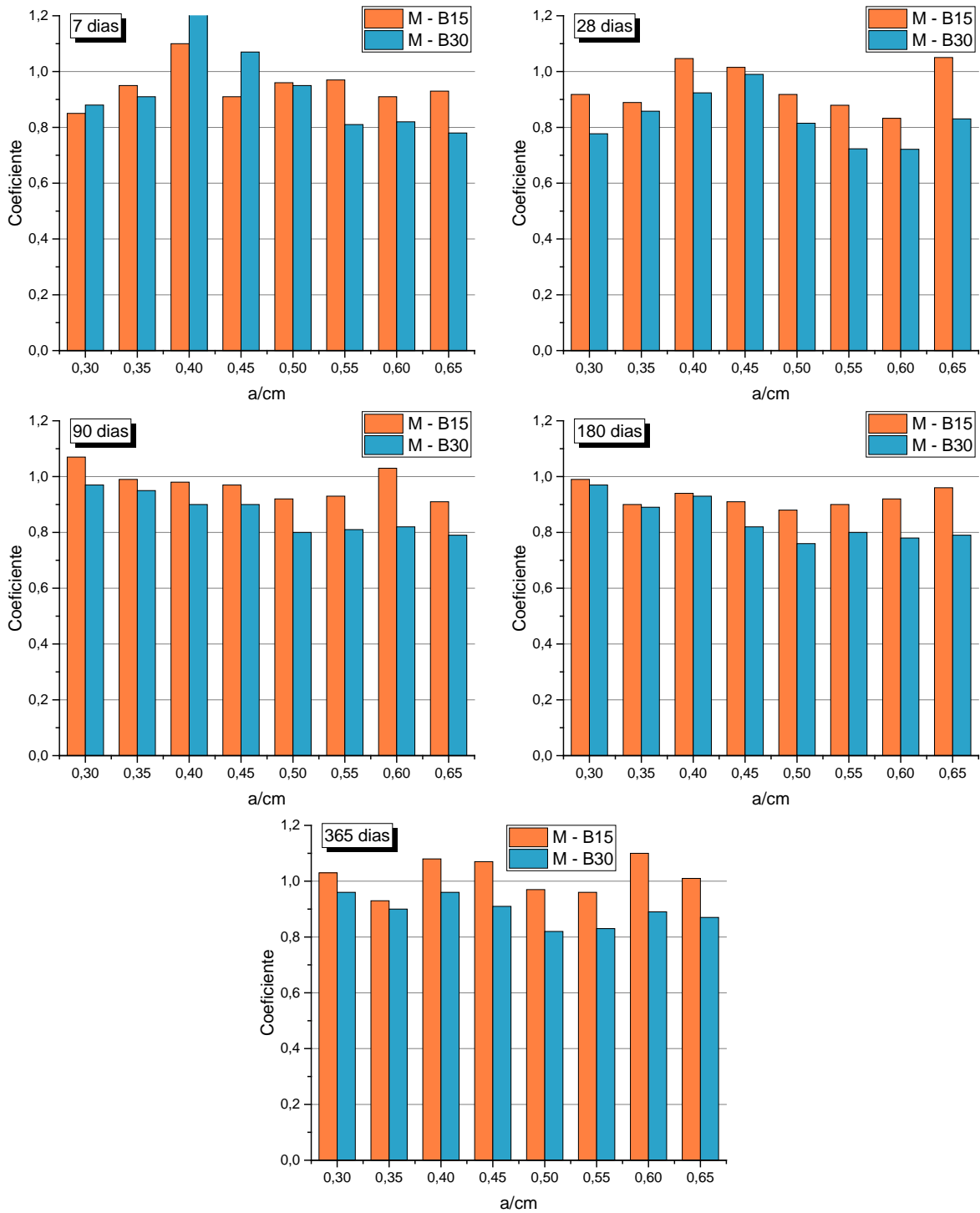
Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)				
		7	28	90	180	365
		Rc <sub>poz.</sub> / Rc <sub>contr.</sub>				
M – B30 – 0,30	0,30	0,88	0,78	0,97	0,97	0,96
M – B30 – 0,35	0,35	0,91	0,86	0,95	0,89	0,90
M – B30 – 0,40	0,40	1,21	0,92	0,90	0,93	0,96
M – B30 – 0,45	0,45	1,07	0,99	0,90	0,82	0,91
M – B30 – 0,50	0,50	0,95	0,81	0,80	0,76	0,82
M – B30 – 0,55	0,55	0,81	0,72	0,81	0,80	0,83
M – B30 – 0,60	0,60	0,82	0,72	0,82	0,78	0,89
M – B30 – 0,65	0,65	0,78	0,83	0,79	0,79	0,87

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Fazendo uma analogia entre as misturas de argamassa e microconcretos, a norma ASTM C-618 (2015) define um valor mínimo de IAR de 0,75 para classificar o material em estudo como pozolana de classe F, aos 7 e 28 dias de cura. Se estas condições fossem válidas para misturas de microconcreto, quase que a totalidade das dosagens estudadas satisfariam os requerimentos da norma. É importante salientar que a inserção de 15% de CBC proporcionou índices sempre acima de 0,75, independentemente da relação a/cm; por outro lado, as misturas com 30% de CBC e relação a/cm igual a 0,55 e 0,60 não estiveram de acordo com o limite estabelecido.

A Figura 8.5 mostra de maneira geral a influência do tempo de cura, relação a/cm e porcentagem de CBC nos Coeficientes Rc<sub>poz.</sub> / Rc<sub>contr.</sub> de Microconcretos.

Figura 8.5 – Influência do tempo de cura, relação a/cm e porcentagem de CBC nos Coeficientes  $R_{c\text{ poz.}} / R_{c\text{ contr.}}$  de Microconcretos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De maneira geral, os dados deixam evidente que as relações a/cm iguais a 0,4 e 0,45 permitem a obtenção de maiores valores de IAR em relação às demais a/cm, independentemente do teor de CBC substituído e idade de cura.

Em relação aos traços com a/cm baixos, percebe-se que existe uma inversão no comportamento em relação à idade de cura, para ambos os teores de substituição de cimento por CBC. De fato, para os traços com relação a/cm 0,3 e 0,35, os valores se mostram menores aos 7 e 28 dias, tornando-se maiores aos 90, 180 e 365 dias. Isso pode ser um indício de que os efeitos físicos regem em sua grande maioria os mecanismos de hidratação nas primeiras idades de cura, ao passo que os efeitos químicos podem ser mais pronunciados a longas idades de cura, após os 90 dias (ARENAS-PIEDRAHITA et al., 2016; ARIF, CLARK e LAKE, 2016; ROSSIGNOLO, RODRIGUES e FRIAS, 2017).

De maneira geral, percebe-se uma leve tendência de redução do IAR para a/cm elevados, sendo mais evidente para os traços com 30% de CBC.

A adição de 15% de CBC novamente tem proporcionado um comportamento mais interessante do ponto de vista pozolânico, visto que coeficientes maiores que a unidade foram constatados para relações a/cm de 0,3, 0,4, 0,45, 0,60 e 0,65, aos 365 dias de cura. Sabendo que este comportamento abrangeu desde relações a/cm baixas até relações a/cm altas, é interessante salientar que a potencialidade pozolânica da CBC pode ser fortemente influenciada pelo teor de substituição de cimento Portland pela pozolana.

Apesar da CBC ter evidenciado menor reatividade quando se incrementa 30% de material em relação à massa de cimento, também se observou maiores valores de IAR aos 365 dias de cura. Isso sugere que CBC continua proporcionando as reações pozolânicas quando seu teor é incrementado, mas a combinação com a portlandita liberada durante as reações de hidratação do cimento Portland parece ser menos efetiva.

Assim como observado nos valores de IAR das composições de argamassas, os coeficientes entre as resistências das misturas com pozolana e as misturas controle também foram menores aos 28 dias de cura.

### **8.1.5 Ganho de Resistência para Microconcretos com CBC**

Uma forma clara de visualizar a contribuição de uma adição na resistência mecânica é calcular a porcentagem de Ganho de Resistência (SG%), na qual leva em consideração a contribuição exclusiva do efeito da pozolana, associada à proporção de cimento nas misturas; trata-se de uma ferramenta nas quais pode traduzir melhor os efeitos de diluição (SORIANO, 2007). Este parâmetro está definido da seguinte forma:



$$SG(\%) = \frac{|R_{c_{poz.}} - (R_{c_{contr.}} * cem_{\%})|}{R_{c_{contr.}} * cem_{\%}} * 100 \quad (8.5)$$

Considerando que:

$R_{c_{poz.}}$  indica a resistência à compressão dos concretos com adição de CBC,  $R_{c_{contr.}}$  é a resistência à compressão dos concretos sem adição de CBC (Controle) e  $cem_{\%}$  é a proporção de cimento na mistura de concreto com substituição (em relação à parte unitária).

As Tabelas 8.11 e 8.12 apresentam os resultados do Ganho de Resistência (SG%) em função da relação a/cm e tempo de cura. Além disso, o efeito do ganho de resistência em função do teor de substituição de CBC está explicitado na Figura 8.6 seguinte.

Tabela 8.11 – Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Microconcretos com 15% de CBC.

Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)				
		7	28	90	180	365
		SG (%)				
M – B15 – 0,30	0,30	0,35	7,98	25,74	16,05	21,02
M – B15 – 0,35	0,35	12,06	4,60	16,43	5,32	9,94
M – B15 – 0,40	0,40	29,62	23,14	15,35	10,53	27,61
M – B15 – 0,45	0,45	7,38	19,42	13,93	7,46	25,54
M – B15 – 0,50	0,50	12,54	8,00	8,30	3,76	14,30
M – B15 – 0,55	0,55	14,16	3,43	9,06	6,27	12,67
M – B15 – 0,60	0,60	7,44	-2,08	20,71	7,71	29,10
M – B15 – 0,65	0,65	9,47	23,58	7,47	13,38	18,39

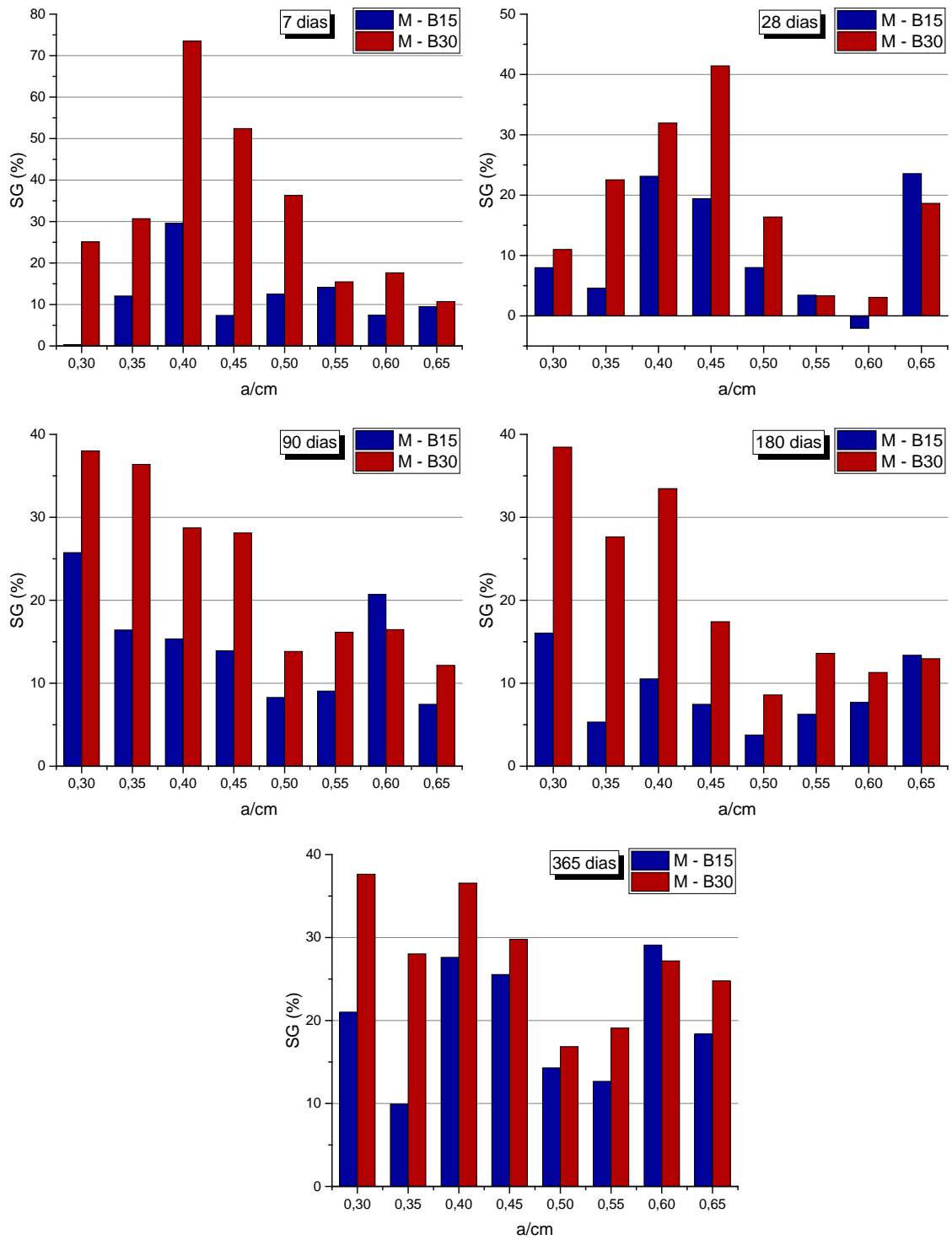
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8.12 – Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Microconcretos com 30% de CBC.

Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)				
		7	28	90	180	365
		SG (%)				
M – B30 – 0,30	0,30	25,12	11,01	38,00	38,47	37,64
M – B30 – 0,35	0,35	30,71	22,55	36,38	27,65	28,03
M – B30 – 0,40	0,40	73,49	31,96	28,73	33,47	36,56
M – B30 – 0,45	0,45	52,42	41,43	28,13	17,43	29,79
M – B30 – 0,50	0,50	36,32	16,38	13,83	8,59	16,85
M – B30 – 0,55	0,55	15,48	3,32	16,15	13,60	19,10
M – B30 – 0,60	0,60	17,65	3,08	16,47	11,30	27,18
M – B30 – 0,65	0,65	10,72	18,64	12,16	12,96	24,78

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 8.6 – Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Microconcretos com 15% e 30% de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De maneira geral, se percebe que a CBC apresenta porcentagens significativas de ganho de resistência (acima de 30%), nas quais os ganhos são altamente dependentes da idade de cura e relação a/cm. Isso também mostra que o consumo de CBC está diretamente relacionado com a evolução e com o aumento da resistência mecânica de microconcretos, ao mesmo tempo em que é evidenciada sua capacidade pozolânica.

Apenas a mistura M – B15 – 0,60 apresenta SG menor que 0; entretanto, esta dosagem já está inserida numa classe de relação a/cm nas quais a CBC demonstra ser menos reativa, para a idade de 28 dias de cura. Entretanto, pelo fato dos demais valores de SG se apresentarem positivos, isto demonstra que a CBC não possui caráter de material inerte.

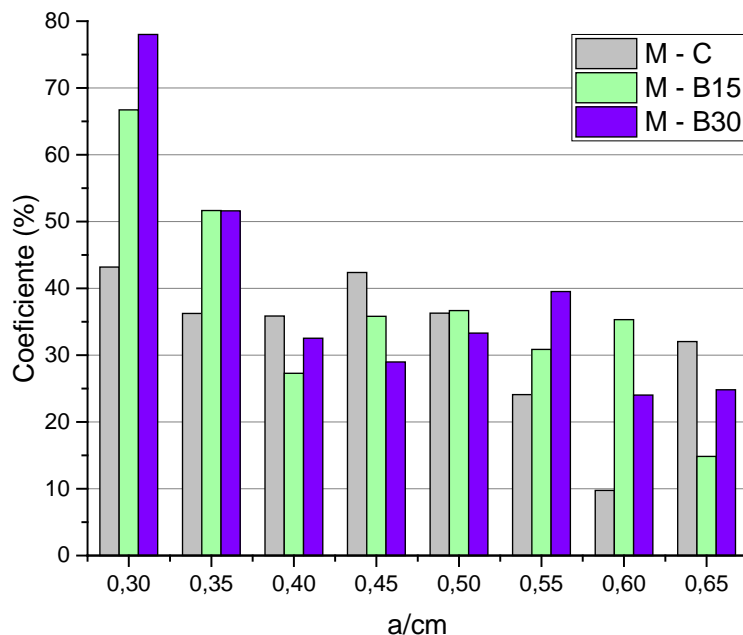
Da mesma forma que observado nos valores de coeficiente entre resistências à compressão, as maiores porcentagens de ganho estão para as misturas com relação a/cm igual 0,4 e 0,45, em particular aos 365 dias de cura, mas que continua se destacando nas demais idades.

De modo geral, as misturas com relações a/cm elevadas proporcionaram menores porcentagens de ganho de resistência, se comparado com as misturas com relação a/cm baixas. Isso mostra que a CBC é um material que não demanda um consumo elevado de água para que as reações com o cimento Portland sejam efetivadas. Os efeitos de diluição parecem ser mais expressivos para misturas com relações a/cm altas nas idades iniciais, onde as porcentagens de ganho são pouco expressivas.

#### **8.1.6 Coeficiente entre as Resistências à Compressão aos 28 dias e 90 dias**

Considerando que a maior taxa no aumento das resistências à compressão se deu dos 28 para os 90 dias de cura, pretende-se avaliar a reatividade da CBC de uma outra forma para os microconcretos estudados. Para isso, se calculou o coeficiente da porcentagem de aumento pela razão entre a resistência à compressão de microconcretos aos 90 dias de cura ( $R_{c90}$ ) e aos 28 dias de cura ( $R_{c28}$ ). A Figura 8.7 representa os valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28 para os 90 dias de cura.

Figura 8.7 – Coeficiente de porcentagem do aumento de resistência mecânica entre 28 e 90 dias de cura.

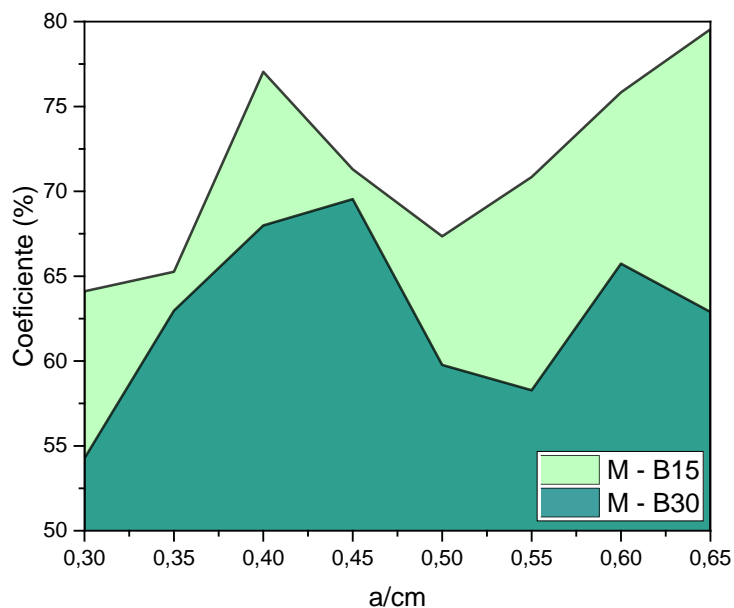


Fonte: Elaboração do próprio autor.

À medida em que a relação  $a/cm$  é reduzida, pode-se notar uma influência mais significativa da CBC no ganho de resistência entre os 28 e 90 dias de cura, indicando que a máxima atividade pozolânica da CBC tem um efeito mais tardio. Além disso, é notório que as misturas com relação  $a/cm$  igual a 0,30, 0,35, 0,55 e 0,60, apesar de evidenciarem baixa reatividade aos 7 e 28 dias de cura, apresentam um crescimento substancial de resistência mecânica aos 90 dias de cura.

De forma a avaliar o comportamento do teor de CBC na contribuição de resistência mecânica ao longo das idades de 28 e 90 dias de cura, também se calculou o coeficiente entre a resistência mecânica de microconcretos com CBC aos 28 dias de cura e a resistência mecânica de microconcretos controle aos 90 dias de cura. A figura 8.8 mostra a evolução dos coeficientes para diferentes relações  $a/cm$  e teor de CBC nas misturas.

Figura 8.8 - Coeficiente entre resistências mecânicas para microconcretos com CBC aos 28 dias de cura e microconcretos controle aos 90 dias de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se que, independentemente do teor de CBC, este incremento apresenta um comportamento bastante habitual frente à incorporação do material pozolânico. De maneira geral, é visto que as misturas com CBC e para relações  $a/cm = 0,4, 0,45, 0,6$  e  $0,65$  tendem a chegar mais próximo da resistência dos traços controle em idades de cura anteriores, isto é, para estas relações, as resistências dos traços com CBC aos 28 dias já chegam a apresentar de 65% a 80% da resistência dos traços controle aos 90 dias de cura.

Em particular, se observa na Figura 8.8 que, aos 28 dias de cura, os microconcretos produzidos com 15% de CBC alcançam até aproximadamente 80% da resistência dos microconcretos controle aos 90 dias, ao passo que os microconcretos produzidos com 30% de CBC alcançam até aproximadamente 70% da resistência dos microconcretos controle aos 90 dias.

## 8.2 MODELO DE CÁLCULO DO FATOR DE $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE

O efeito da reação pozolânica em pastas, argamassas e concretos de cimento/pozolana vem sendo estudado por meio do fator  $k$  de eficácia cimentante, que representa o consumo de cimento que se pode substituir por pozolana em uma pasta, argamassa ou concreto, de forma a obter o mesmo valor de resistência mecânica.

Inicialmente, os valores de fator  $k$  serão avaliados conforme os parâmetros definidos para a produção dos microconcretos, nas quais são aplicadas diferentes relações água/ material cimentante (0,3 a 0,65), para a produção de Microconcreto Controle (sem substituição de CBC) e com substituição em massa de Cimento Portland por 15% e 30% de CBC. Também serão avaliados os tempos de cura referentes a 7, 28, 90, 180 e 365 dias.

Sendo assim, inicialmente serão determinadas curvas de resistência mecânica à compressão dos microconcretos sem e com adição de CBC, frente à relação água/cimento. Para isso foram utilizados os dados experimentais apresentados no item 8.1.3 desta Parte. Neste caso, as curvas serão plotadas em termos de relação água/cimento e não água/material cimentante, visto que a influência da CBC será avaliada considerando que a resistência mecânica das amostras se dão pelo consumo de cimento Portland, isto é, a presença da pozolana realiza um papel equivalente à redução da relação água/cimento, que tem como consequência o aumento na resistência mecânica.

Para o cálculo do fator  $k$ , é importante obter um número de pontos experimentais consideráveis, a fim de minimizar os erros de ajuste das curvas de resistência mecânica. Para isso, serão obtidas equações de ajuste, utilizando os modelos de regressão logarítmico, potencial e linear, além do modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999).

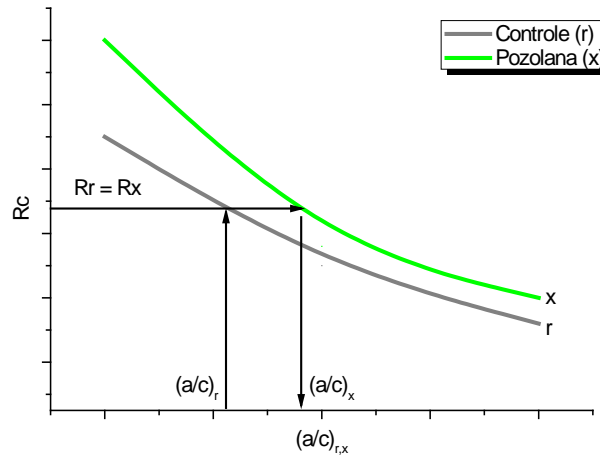
Além disso, para obter o menor erro de ajuste entre as resistências experimentais e teóricas, será utilizada a Equação 8.6, referente ao erro relativo médio ( $e_{rm}$ ):

$$e_{rm}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|R_{c,exp} - R_{c,teo}|}{R_{c,exp}} \right)_i}{n} * 100 \quad (8.6)$$

Onde  $n$  indica o número total de traços fabricados para cada idade de cura.

Tomando como base a Figura 8.9 abaixo, a definição de  $k$  se estabelece quando  $R_r = R_x$ . Portanto, a partir de um valor fixo  $(a/c)_r$ , denominada relação “água/cimento efetiva”, obtém-se o valor  $R_r$ , nas quais induz a obter  $R_x$ , parâmetro fundamental para obter a relação água/cimento  $(a/c)_x$ .

Figura 8.9 – Exemplificação da definição do Fator  $k$  de Eficácia Cimentante.



Fonte: Adaptado de Payá et al. (2013)

Sendo assim, o valor do fator  $k$  de eficácia cimentante pode ser avaliado da seguinte maneira (VELÁZQUEZ, 2002; MARTÍNEZ-VELANDIA, 2006).

$$(a/c)_r = \frac{a}{c_x + K * d_x} \quad (8.7)$$

Sendo:

$d_x$  a quantidade de pozolana (adição),  $c_x$  a quantidade de cimento,  $(a/c)_r$  a relação água/cimento da composição sem adição (efetiva) e “ $a$ ” a quantidade de água para garantir a mesma resistência das misturas com e sem adição de pozolana.

Com os dados anteriores, deixando  $k$  em evidência, seleciona-se então um valor de  $(a/c)_r$  e se determina o valor de  $(a/c)_x$ , obtido a partir da mesma resistência mecânica, nas quais se obtém:

$$k = \frac{1}{(d_x/c_x)} * \left[ \frac{(a/c)_x}{(a/c)_r} - 1 \right] \quad (8.8)$$

A interpretação física de  $k$  pode ser expressa da seguinte forma:

$0 < k < 1$  : implica que se deve adicionar maiores consumos de pozolana em relação ao consumo de cimento substituído, para obter a mesma resistência, mantendo-se a mesma relação água/cimento, e, conseqüentemente, reduzindo a relação água/aglomerante.

$k = 1$  : implica que se deve adicionar uma pozolana com o mesmo consumo de cimento substituído, para igualar as resistências mecânicas.

$k > 1$  : implica que se deve adicionar menores consumos de pozolana em relação ao consumo de cimento substituído, para obter a mesma resistência.

A interpretação física de  $k$  também pode ter como fundamento a avaliação das curvas de resistência à compressão ( $R_c$ ) em função da relação água/cimento ( $a/c$ ), nas quais será analisada da seguinte maneira:

A partir da Equação 8.7 e Figura 8.9, podemos escrever que:

$$\frac{a_r}{c_r} < \frac{a_x}{c_x} \quad (8.9)$$

Em função da adição de pozolana, considera-se que o consumo  $c_x$  é reduzido em relação ao consumo  $c_r$ , chegando, portanto à conclusão:

$$a_r \cdot c_x < a_x \cdot c_r \quad (8.10)$$

Isolando  $k$  a partir da Equação 8.7, e nas condições da Equação 8.10, obtém-se o valor do coeficiente  $k$  de eficácia:

$$k = \frac{a_x \cdot c_r - a_r \cdot c_x}{a_r \cdot d_x} > 0 \quad (8.11)$$

Da mesma forma, pode-se concluir que:

$$\text{Se } \frac{a_r}{c_r} > \frac{a_x}{c_x} \text{ e } a_r \cdot c_x > a_x \cdot c_r, \text{ então } k = \frac{a_x \cdot c_r - a_r \cdot c_x}{a_r \cdot d_x} < 0 \quad (8.12)$$

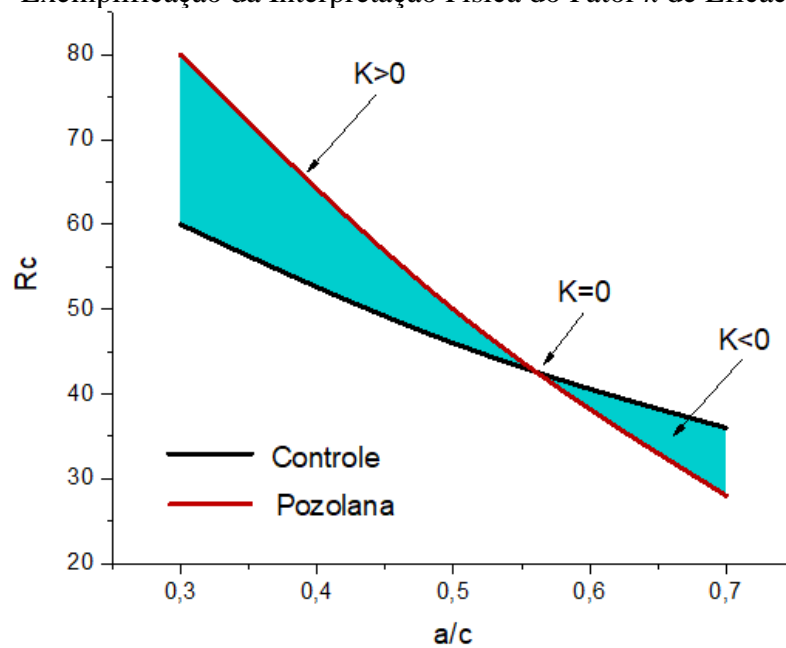
$$\text{Se } \frac{a_r}{c_r} = \frac{a_x}{c_x} \text{ e } a_r \cdot c_x = a_x \cdot c_r, \text{ então } k = \frac{a_x \cdot c_r - a_r \cdot c_x}{a_r \cdot d_x} = 0 \quad (8.13)$$

Nesta última condição, se  $k \leq 0$ , significa que a adição se comporta como um inerte.

A partir das três condições definidas acima, pode-se obter a interpretação física do fator  $k$  por meio da Figura 8.10 seguinte. Sendo assim, esta interpretação servirá de base para identificar as condições entre as curvas teóricas de  $R_c$  x  $a/c$  com e sem adição de CBC.



Figura 8.10 – Exemplificação da Interpretação Física do Fator  $k$  de Eficácia Cimentante.



### 8.3 MODELOS DE AJUSTE DAS CURVAS $R_c$ X $A/C$

Conforme mostrado no item 8.2, a definição de  $k$  se estabelece quando  $R_r = R_x$ . Portanto, para obtenção de melhor ajuste dos dados experimentais de resistência mecânica em função da relação água/cimento, se utilizou quatro modelos de cálculo explicitados abaixo.

#### 8.3.1 Ajuste Logarítmico

Inicialmente, se utilizou o modelo de regressão Logarítmica (neperiano) para ajuste dos dados experimentais de resistência à compressão x  $a/c$  de microconcretos com 15% e 30% de CBC em relação à massa de cimento Portland. Para isso, utilizou-se a equação modelo:

$$R_c = R_o + h * \ln\left(\frac{a}{c}\right) \quad (8.14)$$

Onde  $R_o$  e  $h$  são parâmetros de ajuste da equação.

A tabela 8.13 abaixo mostra os parâmetros de ajuste do modelo proposto ao longo do tempo, bem como o erro relativo médio e o coeficiente de determinação, para as misturas controle, com 15% e 30% em massa de CBC.

Tabela 8.13 – Parâmetros de Ajuste Logarítmico, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação  $a/c$ .

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$R_o$	$h$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
M - C		7,08	-36,38	8,09	0,910
M - B15	7	13,49	-32,35	6,19	0,922
M - B30		16,53	-39,37	6,01	0,935
M - C		9,68	-46,75	4,24	0,968
M - B15	28	16,49	-43,55	3,47	0,973
M - B30		20,67	-42,03	5,61	0,937
M - C		3,32	-75,07	3,35	0,990
M - B15	90	9,47	-83,31	3,84	0,983
M - B30		19,96	-82,46	4,17	0,988
M - C		2,38	-84,31	3,26	0,970
M - B15	180	12,53	-81,98	3,17	0,983
M - B30		20,31	-91	4,64	0,985
M - C		-2,46	-92,65	4,07	0,980
M - B15	365	13,69	-92,5	2,17	0,995
M - B30		23,51	-93,34	4,19	0,987

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.3.2 Ajuste Potencial

Consecutivamente, se utilizou o modelo Potencial para ajuste dos dados experimentais de resistência à compressão  $\times a/c$  de microconcretos com 15% e 30% de CBC em relação à massa de cimento Portland. Para isso, utilizou-se a Equação modelo:

$$R_c = R_o * \left(\frac{a}{c}\right)^h \quad (8.15)$$

Onde  $R_o$  e  $h$  são parâmetros de ajuste da equação.

A tabela 8.14 abaixo mostra os parâmetros de ajuste do modelo proposto ao longo do tempo, bem como o erro relativo médio e o coeficiente de determinação para as misturas controle, com 15% e 30% em massa de CBC.

Tabela 8.14 – Parâmetros de Ajuste Potencial, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação  $a/c$ .

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$R_o$	$h$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
M - C		16,07	-0,97	5,66	0,944
M - B15	7	18,08	-0,95	5,26	0,939
M - B30		18,79	-0,12	6,99	0,919
M - C		20,22	-1,02	4,89	0,955
M - B15	28	22,44	-1,01	3,62	0,962
M - B30		22,75	-1,14	7,26	0,920
M - C		22,69	-1,23	4,01	0,977
M - B15	90	24,85	-1,36	1,78	0,996
M - B30		26,83	-1,52	3,68	0,988
M - C		24,22	-1,26	6,22	0,960
M - B15	180	26,91	-1,29	3,34	0,989
M - B30		28,14	-1,56	3,31	0,990
M - C		23,20	-1,34	4,88	0,976
M - B15	365	29,69	-1,32	3,17	0,988
M - B30		31,41	-1,48	2,09	0,996

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.3.3 Ajuste Linear

Neville (2016) mostra que o gráfico da resistência versus a relação água/cimento pode ter a forma aproximada de uma hipérbole, sendo que isso se aplica a concretos produzidos com qualquer tipo de agregado, e em qualquer idade. Dessa forma, a propriedade geométrica da equação  $y=kx$ , para  $y$  plotado em relação a  $1/x$ , resulta em uma linha reta, sendo o modelo válido para relações  $a/c$  compreendidas entre 0,4 e 0,8.

Além disso, o modelo lienar trata-se de um dos mais usuais para ajuste dos dados experimentais (BIJEN e SELST, 1993; VELÁZQUEZ, 2002; MARTÍNEZ-VELANDIA, 2006; APONTE, 2010). Para isso, utilizou-se a Equação modelo:

$$Rc = Ro + \frac{h}{(a/c)} \quad (8.16)$$

Onde  $Ro$  e  $h$  são parâmetros de ajuste da equação.

A tabela 8.15 abaixo mostra os parâmetros de ajuste do modelo proposto ao longo do tempo, bem como o erro relativo médio e o coeficiente de determinação, para as misturas controle, com 15% e 30% em massa de CBC.

Tabela 8.15 – Parâmetros de Ajuste Linear, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação  $a/c$ .

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$R_o$	$h$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
M - C		-0,84	16,11	5,58	0,951
M - B15	7	1,90	16,49	5,21	0,922
M - B30		-4,49	23,89	7,37	0,900
M - C		0,60	20,22	4,74	0,965
M - B15	28	1,33	21,96	3,55	0,953
M - B30		-1,45	25,30	8,09	0,887
M - C		-11,21	32,44	3,67	0,986
M - B15	90	-21,00	42,77	1,38	0,998
M - B30		-25,79	51,14	2,65	0,993
M - C		-13,56	36,26	5,85	0,956
M - B15	180	-17,12	41,91	2,71	0,990
M - B30		-30,22	56,47	2,27	0,991
M - C		-20,60	40,12	4,40	0,981
M - B15	365	-19,43	47,12	2,34	0,994
M - B30		-28,55	58,06	1,19	0,998

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.3.4 Modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999)

É notório que a equação utilizada para relacionar os dados de  $R_c$  e relação  $a/c$  não necessariamente pode ser o melhor ajuste para todos os tipos de pozolanas. Neste sentido, Alaejos e Fernández (1999) propõem uma equação exponencial para obter o fator  $k$  da sílica ativa, que tem a seguinte forma:

$$R_c = e^{A-p(a/c)} \quad (8.17)$$

Onde se estabelece que o parâmetro “ $A$ ” depende unicamente do agregado utilizado nos concretos e “ $p$ ” depende do material cimentício (cimento + pozolana). Para verificar o ajuste dos dados experimentais com esse tipo de equação, segue os dados de correlação na Tabela 8.16, juntamente como o erro relativo médio e o coeficiente de determinação.

Tabela 8.16 – Parâmetros de Ajuste do Modelo proposto por Alaejos, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação  $a/c$ .

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$A$	$p$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
M - C	7	4,52	2,08	7,97	0,896
M - B15		4,45	1,75	5,87	0,923
M - B30		4,74	1,91	5,93	0,943
M - C	28	4,86	2,24	4,36	0,962
M - B15		4,80	1,90	3,29	0,974
M - B30		4,81	1,79	5,01	0,959
M - C	90	5,36	2,70	3,09	0,987
M - B15		5,46	2,53	2,26	0,993
M - B30		5,51	2,34	2,74	0,993
M - C	180	5,49	2,79	3,95	0,979
M - B15		5,44	2,42	2,48	0,990
M - B30		5,62	2,40	2,70	0,994
M - C	365	5,58	2,95	3,60	0,985
M - B15		5,58	2,47	1,58	0,997
M - B30		5,61	2,27	2,31	0,995

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.3.5 Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação

Os valores dos parâmetros de ajuste mostraram um comportamento contínuo ao longo do tempo de cura. Além disso, para o modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999), os valores são bastante similares ao proposto neste trabalho, onde  $A = 7,27$  e  $p$  situa-se em torno de 1,5.

Entretanto, se observa que os valores de erro relativo médio são consideravelmente maiores aos 7 e 28 dias de cura, ao mesmo tempo que os valores do coeficiente de determinação se reduzem às mesmas idades de cura. Para o modelo linear, valores de 8,09% foram obtidos para erro relativo médio, ao mesmo tempo que se observa coeficientes de determinação de 0,887. Pode-se perceber que, de acordo com as Figuras 8.11 a 8.14 seguintes, grande parte dos pontos experimentais das resistências dos microconcretos controle, com 15% de CBC e 30% de CBC não coincidem com a linha teórica de ajuste dos modelos.

Entretanto, aos 90, 180 e 365 dias de cura, é observado um comportamento oposto das idades iniciais, nas quais os valores de erro relativo médio são consideravelmente baixos, enquanto incrementam-se os valores do coeficiente de determinação. Constata-se, portanto, que

os valores de ajustes das equações são aceitáveis para o cálculo de  $k$ , com erros relativos médios abaixo de 5% e coeficiente de determinação acima de 0,99 (GOPALAN, 1995; MARTÍNEZ-VELANDIA, 2006; PAYÁ et al., 2013).

Em relação aos parâmetros de ajuste, também fica evidente que os modelos logarítmico e de Alaejos apresentam similaridade entre si, fato também observado entre os modelos potencial e linear. Pode-se observar que, para os modelos logarítmico e de Alaejos, os valores de  $k$  podem ser notadamente influenciados nas primeiras idades (7 e 28 dias), em função do aumento dos erros absolutos para os traços controle, ao passo, que para os modelos potencial e linear, o aumento dos erros absolutos pode gerar discrepâncias nos valores de eficácia cimentante para os traços com 30% de CBC.

Apesar de ser constatado alguns índices mais altos de  $e_{mr}$  (%), se dará atenção a todos os modelos para o cálculo de  $k$ , visto que cada um deles possui sua particularidade nos parâmetros quando se altera o tempo de cura e a inserção de CBC em relação às misturas controle.

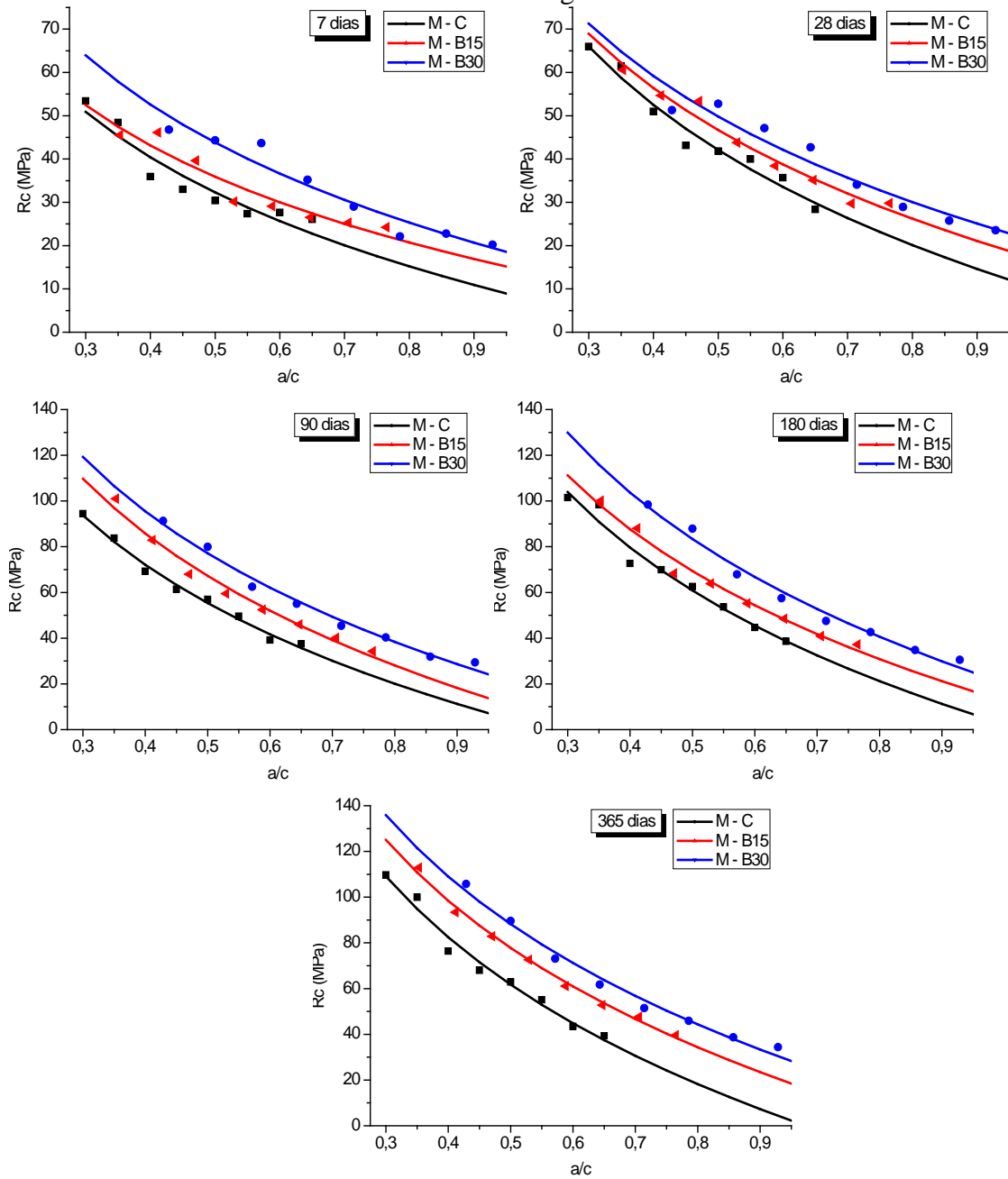
#### **8.4 CURVAS TEÓRICAS $R_c$ X A/C AJUSTADAS AOS DADOS EXPERIMENTAIS**

A metodologia exemplificada nos itens 8.2 e 8.3 mostra que as curvas teóricas obtidas servirão de base para obtenção dos valores de  $(a/c)x$ . Portanto, a partir dos modelos de regressão, seguem as curvas teóricas ajustadas aos dados experimentais, correspondentes a cada uma das idades de cura e porcentagem de substituição de CBC.

##### **8.4.1 Modelo Logarítmico**

A Figura 8.11 mostra as curvas teóricas do Modelo Logarítmico ajustadas aos dados experimentais, correspondentes a cada uma das idades de cura e porcentagem de substituição de CBC.

Figura 8.11 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $a/c$  ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Logarítmico.

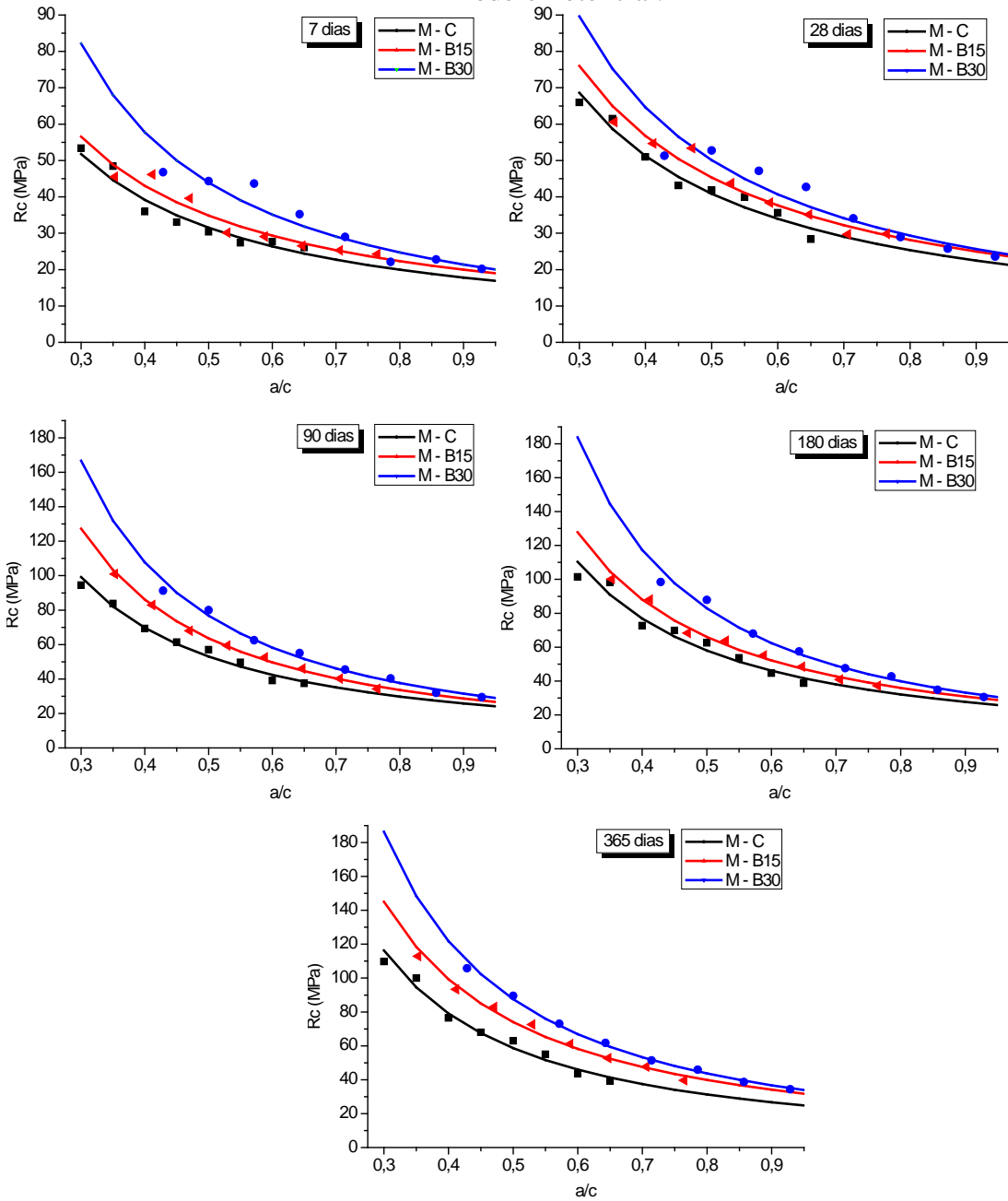


Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 8.4.2 Modelo Potencial

A Figura 8.12 mostra as curvas teóricas do Modelo Potencial ajustadas aos dados experimentais, correspondentes a cada uma das idades de cura e porcentagem de substituição de CBC.

Figura 8.12 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $a/c$  ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Potencial.



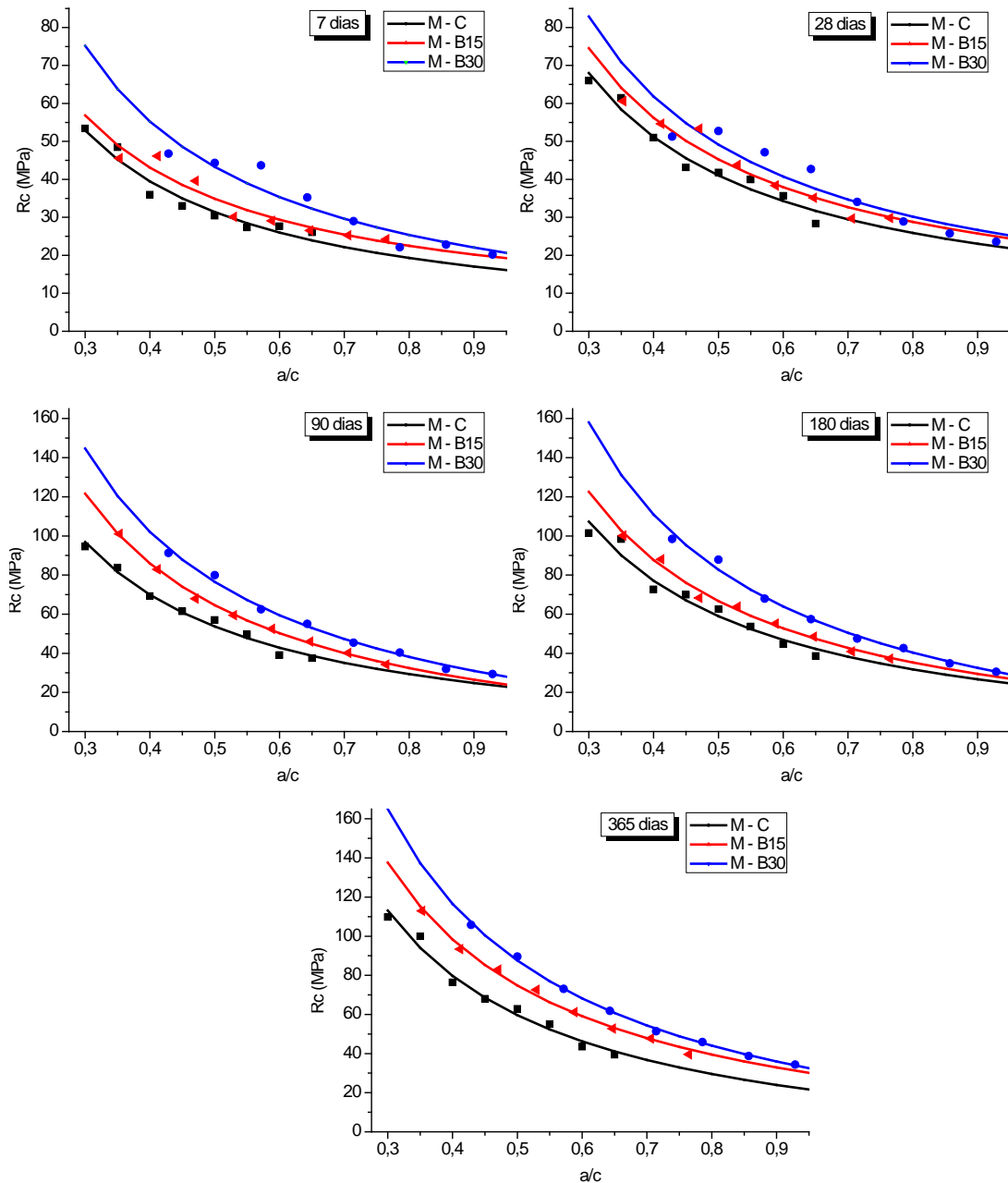
Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.4.3 Modelo Linear

A Figura 8.13 mostra as curvas teóricas do Modelo Linear ajustadas aos dados experimentais, correspondentes a cada uma das idades de cura e porcentagem de substituição de CBC.



Figura 8.13 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $a/c$  ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Linear.

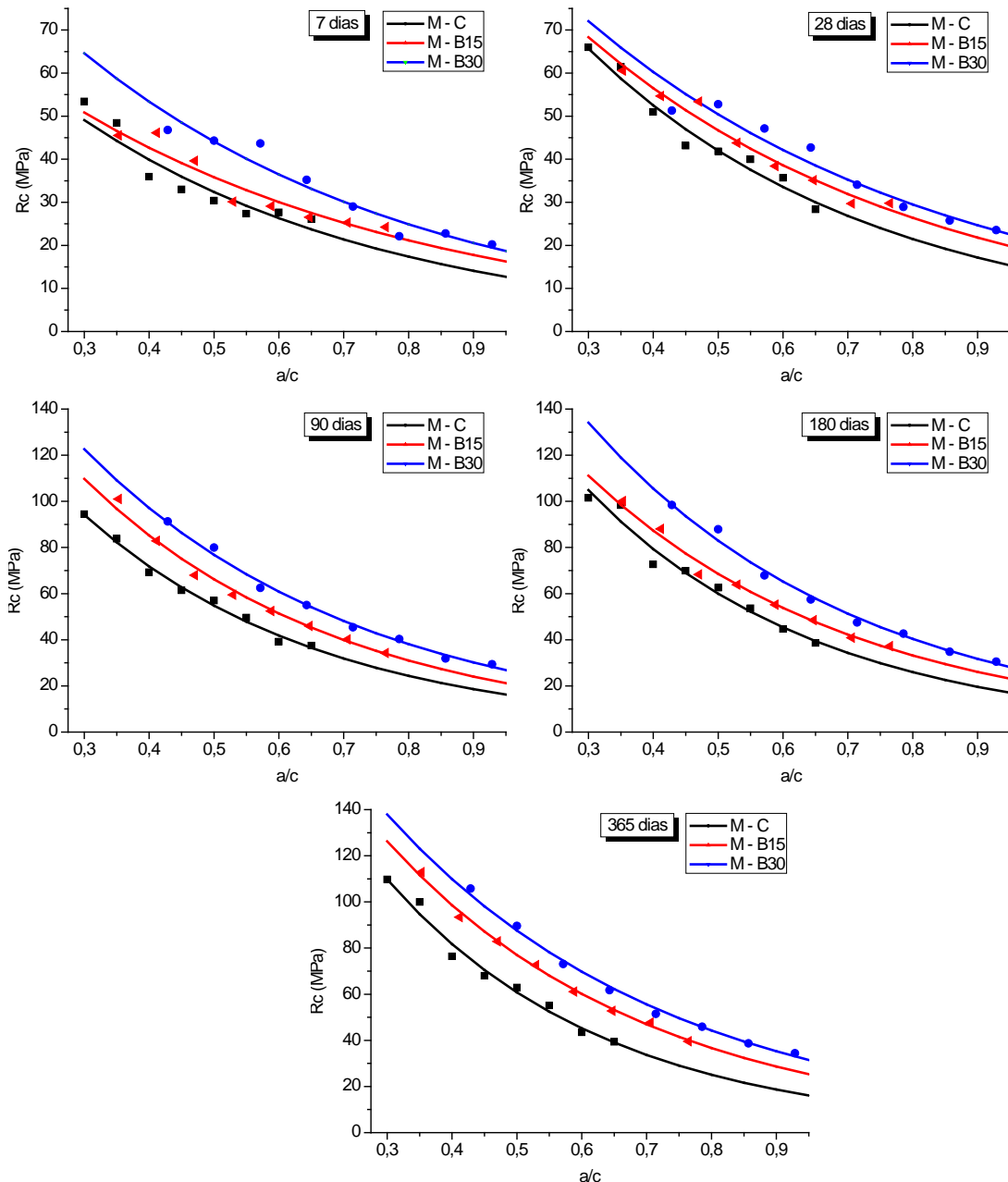


Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 8.4.4 Modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999)

A Figura 8.14 mostra as curvas teóricas do Modelo Proposto por Alaejos e Fernández, ajustadas aos dados experimentais e correspondentes a cada uma das idades de cura e porcentagem de substituição de CBC.

Figura 8.14 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $a/c$  ajustadas aos dados experimentais, utilizando o Modelo Proposto por Alaejos e Fernández (1999).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 8.4.5 Avaliação das curvas teóricas ajustadas sobre os dados experimentais

Analisando as Figuras 8.11 a 8.14, fica evidente que o melhor ajuste dos dados experimentais para obtenção dos dados teóricos dos microconcretos refere-se a idades mais avançadas, aos 90, 180 e 365 dias de cura.

Os ajustes mais deficientes foram observados nas idades de 7 e 28 dias, e os dados se mostraram mais afetados para os traços com 15% e 30% de CBC e relações  $a/c$  menores, indicando que os dados experimentais se mostram tão acima ou tão baixo da curva teórica.

Em momento algum, se observou que as curvas com adição de CBC se mostraram abaixo da curva controle, indicando que o fator de eficácia é sempre maior que 0 (Figura 8.10). Portanto isso é um indicativo que a CBC não apresenta caráter inerte, e que as reações pozolânicas podem ser efetivas ao longo do tempo de cura.

No modelo logaritmico, verifica-se um aumento na taxa de redução das resistências mecânicas à compressão à medida em que se utilizam relações  $a/c$  altas. De fato, para  $a/c = 0,95$ , a resistência à compressão da mistura controle tende a 0 aos 365 dias de cura.

Para os modelos potencial, linear e de Alaejos, aparentemente foram notados desvios mais evidentes das curvas para relações  $a/c$  baixas, entretanto deve-se considerar que a falta de dados experimentais para essa região leva à extrapolação das curvas. Além disso, as curvas evidenciam um comportamento distinto, mostrando que o ganho de resistência é mais fortemente governado quando se utiliza relações  $a/c$  baixas, fato também observado no ganho de resistência dos microconcretos.

Velázquez (2002) e Aponte (2010) mostram que as curvas apresentam maior crescimento entre o controle e com adição quando se trabalha com relação  $a/c$  menor, aplicando-se o modelo Linear.

## **8.5 RESULTADOS DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE**

Neste tópico, serão avaliados os valores dos coeficientes  $k$  de eficácia cimentante de microconcretos com adição de 15% e 30% de CBC em relação à massa de cimento, para distintas relações  $a/c$  e tempos de cura. Da mesma forma, os valores de  $k$  são obtidos por meio dos modelos de ajuste dos dados experimentais de resistência mecânica à compressão.

### **8.5.1 Modelo Logarítmico**

Na tabela 8.17 abaixo estão tabulados os valores dos coeficientes de eficácia cimentante da CBC em função do tempo de cura e teores de substituição de CBC. Também são indicados os valores da relação água/cimento efetiva  $(a/c)_r$  e relação água/cimento  $(a/c)_x$  para o modelo logarítmico.

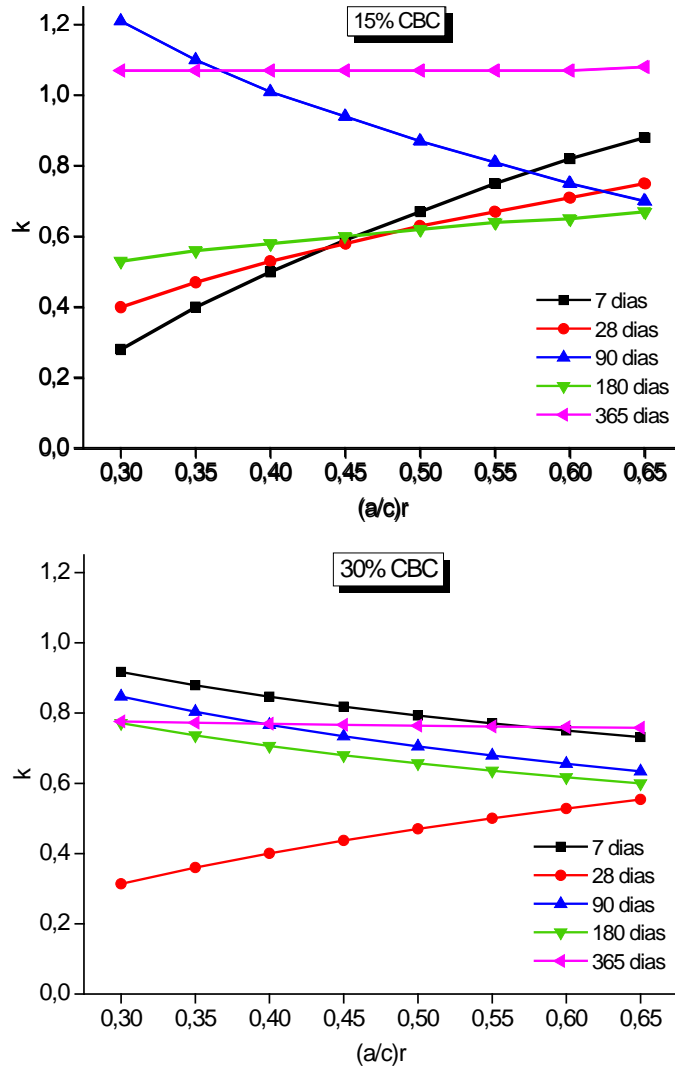
Tabela 8.17 – Valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e  $(a/c)_r$  – Modelo Logarítmico.

Tempo (dias)	$(a/c)_r$	% CBC			
		15%		30%	
		$(a/c)_x$	$k$	$(a/c)_x$	$k$
7	0,3	0,315	<b>0,28</b>	0,418	<b>0,92</b>
	0,35	0,374	<b>0,40</b>	0,482	<b>0,88</b>
	0,4	0,435	<b>0,50</b>	0,545	<b>0,85</b>
	0,45	0,497	<b>0,59</b>	0,608	<b>0,82</b>
	0,5	0,559	<b>0,67</b>	0,670	<b>0,79</b>
	0,55	0,623	<b>0,75</b>	0,732	<b>0,77</b>
	0,6	0,686	<b>0,82</b>	0,793	<b>0,75</b>
	0,65	0,751	<b>0,88</b>	0,854	<b>0,73</b>
28	0,3	0,321	<b>0,40</b>	0,340	<b>0,31</b>
	0,35	0,379	<b>0,47</b>	0,404	<b>0,36</b>
	0,4	0,437	<b>0,53</b>	0,469	<b>0,40</b>
	0,45	0,496	<b>0,58</b>	0,534	<b>0,44</b>
	0,5	0,556	<b>0,63</b>	0,601	<b>0,47</b>
	0,55	0,615	<b>0,67</b>	0,668	<b>0,50</b>
	0,6	0,676	<b>0,71</b>	0,736	<b>0,53</b>
	0,65	0,736	<b>0,75</b>	0,804	<b>0,55</b>
90	0,3	0,364	<b>1,21</b>	0,409	<b>0,85</b>
	0,35	0,418	<b>1,10</b>	0,471	<b>0,80</b>
	0,4	0,471	<b>1,01</b>	0,531	<b>0,77</b>
	0,45	0,524	<b>0,94</b>	0,592	<b>0,73</b>
	0,5	0,577	<b>0,87</b>	0,651	<b>0,70</b>
	0,55	0,628	<b>0,81</b>	0,710	<b>0,68</b>
	0,6	0,679	<b>0,75</b>	0,769	<b>0,66</b>
	0,65	0,730	<b>0,70</b>	0,827	<b>0,63</b>
180	0,3	0,328	<b>0,53</b>	0,399	<b>0,77</b>
	0,35	0,384	<b>0,56</b>	0,460	<b>0,74</b>
	0,4	0,441	<b>0,58</b>	0,521	<b>0,71</b>
	0,45	0,498	<b>0,60</b>	0,581	<b>0,68</b>
	0,5	0,555	<b>0,62</b>	0,641	<b>0,66</b>
	0,55	0,612	<b>0,64</b>	0,700	<b>0,64</b>
	0,6	0,669	<b>0,65</b>	0,759	<b>0,62</b>
	0,65	0,727	<b>0,67</b>	0,817	<b>0,60</b>
365	0,3	0,357	<b>1,07</b>	0,400	<b>0,78</b>
	0,35	0,416	<b>1,07</b>	0,466	<b>0,77</b>
	0,4	0,476	<b>1,07</b>	0,532	<b>0,77</b>
	0,45	0,535	<b>1,07</b>	0,598	<b>0,77</b>
	0,5	0,595	<b>1,07</b>	0,664	<b>0,76</b>
	0,55	0,654	<b>1,07</b>	0,730	<b>0,76</b>
	0,6	0,714	<b>1,07</b>	0,795	<b>0,76</b>
	0,65	0,773	<b>1,08</b>	0,861	<b>0,76</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 8.15 abaixo foram plotados os valores do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante dos microconcretos em função da relação água/cimento, comparando cada um deles com o teor de substituição fixa (15% e 30% de CBC).

Figura 8.15 – Influência da relação (a/c)r, tempo de cura e porcentagem de CBC nos valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo Logarítmico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.5.2 Modelo Potencial

Na tabela 8.18 abaixo estão tabulados os valores dos coeficientes de eficácia cimentante da CBC ao longo do tempo de cura. São indicados os valores da relação água/cimento efetiva (a/c)r e relação água/cimento (a/c)x da mistura com pozolana, para o modelo Potencial.

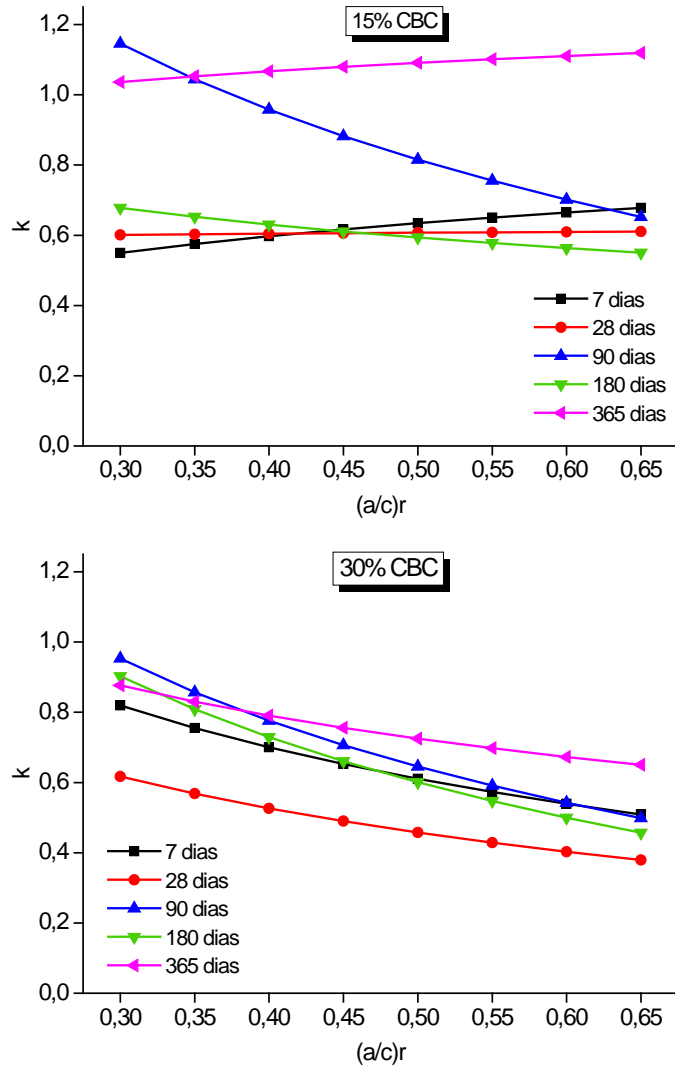
Tabela 8.18 – Valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e  $(a/c)_r$  – Modelo Potencial.

Tempo (dias)	$(a/c)_r$	% CBC			
		15%		30%	
		$(a/c)_x$	$k$	$(a/c)_x$	$k$
7	0,3	0,329	<b>0,55</b>	0,405	<b>0,82</b>
	0,35	0,386	<b>0,58</b>	0,463	<b>0,75</b>
	0,4	0,442	<b>0,60</b>	0,520	<b>0,70</b>
	0,45	0,499	<b>0,62</b>	0,576	<b>0,65</b>
	0,5	0,556	<b>0,63</b>	0,631	<b>0,61</b>
	0,55	0,613	<b>0,65</b>	0,685	<b>0,57</b>
	0,6	0,670	<b>0,66</b>	0,739	<b>0,54</b>
	0,65	0,728	<b>0,68</b>	0,792	<b>0,51</b>
28	0,3	0,332	<b>0,60</b>	0,379	<b>0,62</b>
	0,35	0,387	<b>0,60</b>	0,435	<b>0,57</b>
	0,4	0,443	<b>0,60</b>	0,490	<b>0,53</b>
	0,45	0,498	<b>0,61</b>	0,544	<b>0,49</b>
	0,5	0,554	<b>0,61</b>	0,598	<b>0,46</b>
	0,55	0,609	<b>0,61</b>	0,651	<b>0,43</b>
	0,6	0,665	<b>0,61</b>	0,704	<b>0,40</b>
	0,65	0,720	<b>0,61</b>	0,756	<b>0,38</b>
90	0,3	0,361	<b>1,15</b>	0,423	<b>0,95</b>
	0,35	0,415	<b>1,04</b>	0,479	<b>0,86</b>
	0,4	0,468	<b>0,96</b>	0,533	<b>0,78</b>
	0,45	0,520	<b>0,88</b>	0,586	<b>0,71</b>
	0,5	0,572	<b>0,82</b>	0,638	<b>0,65</b>
	0,55	0,623	<b>0,76</b>	0,689	<b>0,59</b>
	0,6	0,674	<b>0,70</b>	0,740	<b>0,54</b>
	0,65	0,725	<b>0,65</b>	0,789	<b>0,50</b>
180	0,3	0,336	<b>0,68</b>	0,416	<b>0,90</b>
	0,35	0,390	<b>0,65</b>	0,471	<b>0,81</b>
	0,4	0,444	<b>0,63</b>	0,525	<b>0,73</b>
	0,45	0,499	<b>0,61</b>	0,577	<b>0,66</b>
	0,5	0,552	<b>0,59</b>	0,629	<b>0,60</b>
	0,55	0,606	<b>0,58</b>	0,679	<b>0,55</b>
	0,6	0,660	<b>0,56</b>	0,729	<b>0,50</b>
	0,65	0,713	<b>0,55</b>	0,777	<b>0,46</b>
365	0,3	0,355	<b>1,04</b>	0,413	<b>0,88</b>
	0,35	0,415	<b>1,05</b>	0,475	<b>0,83</b>
	0,4	0,475	<b>1,07</b>	0,535	<b>0,79</b>
	0,45	0,536	<b>1,08</b>	0,596	<b>0,76</b>
	0,5	0,596	<b>1,09</b>	0,655	<b>0,73</b>
	0,55	0,657	<b>1,10</b>	0,714	<b>0,70</b>
	0,6	0,718	<b>1,11</b>	0,773	<b>0,67</b>
	0,65	0,778	<b>1,12</b>	0,831	<b>0,65</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segue na Figura 8.16 abaixo os valores do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante dos microconcretos plotados em função da relação água/cimento para o modelo proposto.

Figura 8.16 – Influência da relação  $(a/c)r$ , tempo de cura e porcentagem de CBC nos valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo Potencial.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.5.3 Modelo Linear

Na tabela 8.19 encontram-se os valores dos coeficientes de eficácia cimentante da CBC ao longo do tempo de cura, referente ao modelo Linear. Também são indicados os valores da relação água/cimento efetiva  $(a/c)r$  e relação água/cimento  $(a/c)x$ .

Tabela 8.19 – Valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e  $(a/c)_r$  – Modelo Linear.

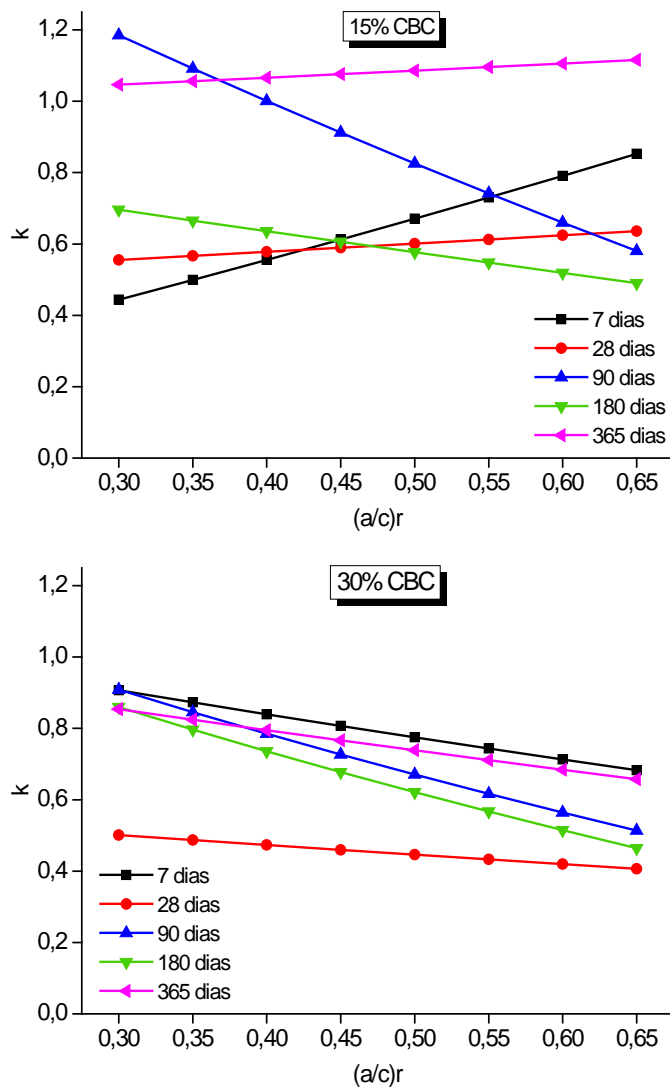
Tempo (dias)	$(a/c)_r$	% CBC			
		15% $(a/c)_x$	$k$	30% $(a/c)_x$	$k$
7	0,3	0,323	<b>0,44</b>	0,417	<b>0,91</b>
	0,35	0,381	<b>0,50</b>	0,481	<b>0,87</b>
	0,4	0,439	<b>0,56</b>	0,544	<b>0,84</b>
	0,45	0,499	<b>0,61</b>	0,606	<b>0,81</b>
	0,5	0,559	<b>0,67</b>	0,666	<b>0,77</b>
	0,55	0,621	<b>0,73</b>	0,725	<b>0,74</b>
	0,6	0,684	<b>0,79</b>	0,783	<b>0,71</b>
	0,65	0,748	<b>0,85</b>	0,840	<b>0,68</b>
28	0,3	0,329	<b>0,56</b>	0,364	<b>0,50</b>
	0,35	0,385	<b>0,57</b>	0,423	<b>0,49</b>
	0,4	0,441	<b>0,58</b>	0,481	<b>0,47</b>
	0,45	0,497	<b>0,59</b>	0,539	<b>0,46</b>
	0,5	0,553	<b>0,60</b>	0,596	<b>0,45</b>
	0,55	0,609	<b>0,61</b>	0,652	<b>0,43</b>
	0,6	0,666	<b>0,62</b>	0,708	<b>0,42</b>
	0,65	0,723	<b>0,64</b>	0,763	<b>0,41</b>
90	0,3	0,363	<b>1,18</b>	0,417	<b>0,91</b>
	0,35	0,417	<b>1,09</b>	0,477	<b>0,85</b>
	0,4	0,471	<b>1,00</b>	0,535	<b>0,78</b>
	0,45	0,522	<b>0,91</b>	0,590	<b>0,73</b>
	0,5	0,573	<b>0,83</b>	0,644	<b>0,67</b>
	0,55	0,622	<b>0,74</b>	0,695	<b>0,62</b>
	0,6	0,670	<b>0,66</b>	0,745	<b>0,56</b>
	0,65	0,717	<b>0,58</b>	0,793	<b>0,51</b>
180	0,3	0,337	<b>0,70</b>	0,411	<b>0,86</b>
	0,35	0,391	<b>0,67</b>	0,470	<b>0,80</b>
	0,4	0,445	<b>0,64</b>	0,526	<b>0,74</b>
	0,45	0,498	<b>0,61</b>	0,581	<b>0,68</b>
	0,5	0,551	<b>0,58</b>	0,633	<b>0,62</b>
	0,55	0,603	<b>0,55</b>	0,684	<b>0,57</b>
	0,6	0,655	<b>0,52</b>	0,732	<b>0,51</b>
	0,65	0,706	<b>0,49</b>	0,779	<b>0,46</b>
365	0,3	0,355	<b>1,05</b>	0,410	<b>0,85</b>
	0,35	0,415	<b>1,06</b>	0,474	<b>0,82</b>
	0,4	0,475	<b>1,07</b>	0,536	<b>0,80</b>
	0,45	0,535	<b>1,08</b>	0,598	<b>0,77</b>
	0,5	0,596	<b>1,09</b>	0,658	<b>0,74</b>
	0,55	0,656	<b>1,10</b>	0,718	<b>0,71</b>
	0,6	0,717	<b>1,11</b>	0,776	<b>0,68</b>
	0,65	0,778	<b>1,12</b>	0,833	<b>0,66</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.



Na Figura 8.17 abaixo foram plotados os valores do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante dos microconcretos em função da relação água/cimento para o modelo Linear, nas quais compara os valores de  $k$  para cada teor de substituição fixa (15% e 30% de CBC).

Figura 8.17 – Influência da relação (a/c)r, tempo de cura e porcentagem de CBC nos valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo Linear.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 8.5.4 Modelo proposto por Alaejos e Fernández (1999)

Os valores dos coeficientes de eficácia cimentante da CBC encontram-se na Tabela 8.20, referente ao modelo proposto por Alaejos e Fernández. Também são indicados os valores da relação água/cimento efetiva (a/c)r e relação água/cimento (a/c)x da mistura com pozolana.

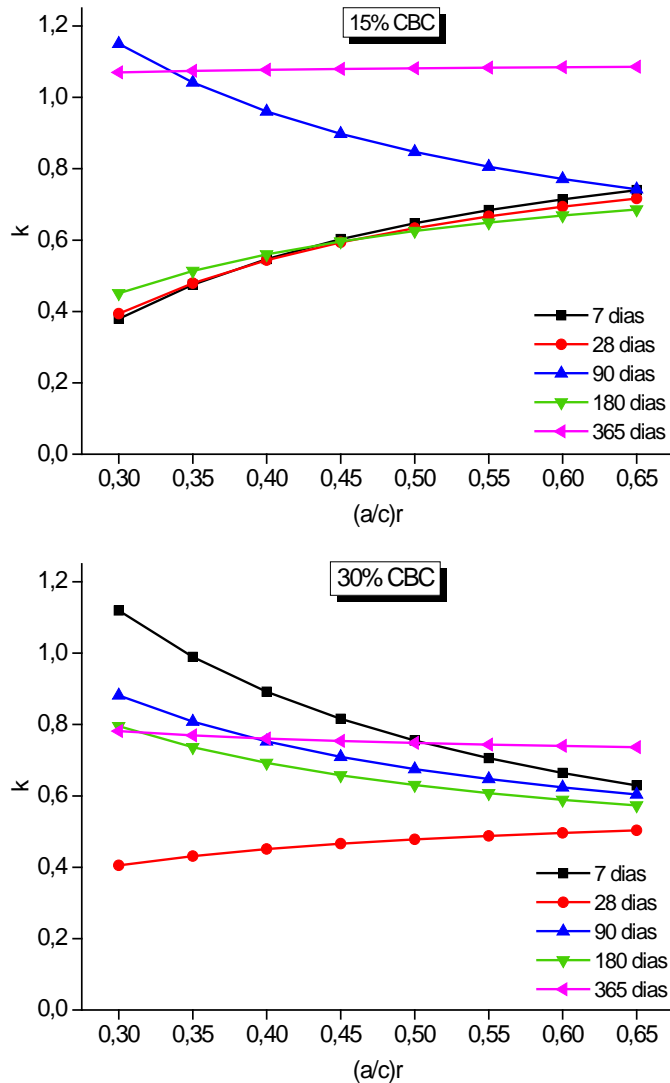
Tabela 8.20 – Valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos com CBC em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e  $(a/c)_r$  – Modelo Alaejos.

Tempo (dias)	$(a/c)_r$	% CBC			
		15%		30%	
		$(a/c)_x$	$k$	$(a/c)_x$	$k$
7	0,3	0,320	<b>0,38</b>	0,444	<b>1,12</b>
	0,35	0,379	<b>0,47</b>	0,498	<b>0,99</b>
	0,4	0,439	<b>0,55</b>	0,553	<b>0,89</b>
	0,45	0,498	<b>0,60</b>	0,607	<b>0,82</b>
	0,5	0,557	<b>0,65</b>	0,662	<b>0,76</b>
	0,55	0,616	<b>0,68</b>	0,716	<b>0,71</b>
	0,6	0,676	<b>0,71</b>	0,771	<b>0,66</b>
	0,65	0,735	<b>0,74</b>	0,825	<b>0,63</b>
28	0,3	0,321	<b>0,39</b>	0,352	<b>0,41</b>
	0,35	0,380	<b>0,48</b>	0,415	<b>0,43</b>
	0,4	0,438	<b>0,54</b>	0,477	<b>0,45</b>
	0,45	0,497	<b>0,59</b>	0,540	<b>0,47</b>
	0,5	0,556	<b>0,63</b>	0,602	<b>0,48</b>
	0,55	0,615	<b>0,67</b>	0,665	<b>0,49</b>
	0,6	0,673	<b>0,69</b>	0,728	<b>0,50</b>
	0,65	0,732	<b>0,72</b>	0,790	<b>0,50</b>
90	0,3	0,361	<b>1,15</b>	0,413	<b>0,88</b>
	0,35	0,414	<b>1,04</b>	0,471	<b>0,81</b>
	0,4	0,468	<b>0,96</b>	0,529	<b>0,75</b>
	0,45	0,521	<b>0,90</b>	0,587	<b>0,71</b>
	0,5	0,575	<b>0,85</b>	0,645	<b>0,68</b>
	0,55	0,628	<b>0,81</b>	0,703	<b>0,65</b>
	0,6	0,682	<b>0,77</b>	0,760	<b>0,62</b>
	0,65	0,735	<b>0,74</b>	0,818	<b>0,60</b>
180	0,3	0,324	<b>0,45</b>	0,402	<b>0,80</b>
	0,35	0,382	<b>0,51</b>	0,460	<b>0,74</b>
	0,4	0,440	<b>0,56</b>	0,519	<b>0,69</b>
	0,45	0,497	<b>0,60</b>	0,577	<b>0,66</b>
	0,5	0,555	<b>0,63</b>	0,635	<b>0,63</b>
	0,55	0,613	<b>0,65</b>	0,693	<b>0,61</b>
	0,6	0,671	<b>0,67</b>	0,751	<b>0,59</b>
	0,65	0,729	<b>0,69</b>	0,810	<b>0,57</b>
365	0,3	0,357	<b>1,07</b>	0,400	<b>0,78</b>
	0,35	0,416	<b>1,07</b>	0,465	<b>0,77</b>
	0,4	0,476	<b>1,08</b>	0,530	<b>0,76</b>
	0,45	0,536	<b>1,08</b>	0,595	<b>0,75</b>
	0,5	0,595	<b>1,08</b>	0,660	<b>0,75</b>
	0,55	0,655	<b>1,08</b>	0,725	<b>0,74</b>
	0,6	0,715	<b>1,08</b>	0,790	<b>0,74</b>
	0,65	0,775	<b>1,09</b>	0,855	<b>0,74</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 8.18 abaixo foram plotados os valores do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante dos microconcretos em função da relação água/cimento para o modelo de Alaejos, nas quais compara os valores de  $k$  para cada teor de substituição fixa (15% e 30% de CBC).

Figura 8.18 – Influência da relação a/c, tempo de cura e porcentagem de CBC nos valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Microconcretos – Modelo: Alaejos e Fernández (1999).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 8.5.5 Escolha do método de ajuste mais viável

A escolha do modelo de ajuste das curvas experimentais tem grande influência na obtenção do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante, visto que  $k$  se mostra altamente sensível às variações dos erros relativos médios.

Com base na discussão dos valores de resistência à compressão, dos coeficientes entre resistências e porcentagem de ganho de resistência (SG%), os dados indicam a possível reatividade a longo prazo da CBC. Portanto, os modelos Logaritmico, Linear e Alaejos parecem

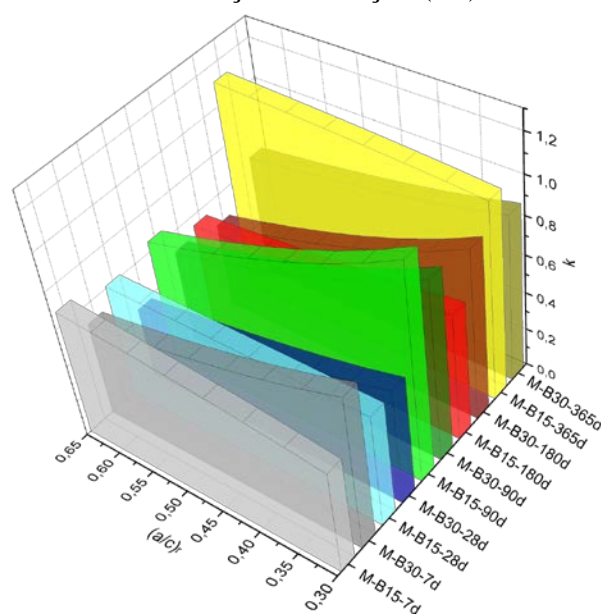
descrever um comportamento não habitual quanto à eficácia da CBC a curto prazo, principalmente aos 7 dias de cura, mostrando efetividades superiores às idades mais avançadas de 90 e 365 dias. Além disso, os modelos citados também parecem não proporcionar um comportamento lógico entre os valores de  $k$  e a relação  $a/c$ ; de fato, altos coeficientes foram obtidos para relações  $a/c$  elevadas e a curto prazo, ao mesmo tempo em que a fase líquida continuou sendo suficiente para relações  $a/c$  baixas a longo prazo, que garantiu os maiores coeficientes de eficácia.

Em comparação aos trabalhos que tenham utilizado em sua grande maioria os modelos de ajuste linear e potencial para descrever a evolução das resistências mecânicas de concretos com adição de cinza volante (GOPALAN e HAQUE, 1985; APONTE, 2010; MURUMI e GUPTA, 2015), se decidiu dar mais atenção para discussão dos valores de  $k$  obtidos através do modelo potencial.

### 8.5.6 Discussão dos resultados obtidos

Os resultados obtidos indicam que o comportamento da eficácia cimentante de microconcretos constituídos de cinza do cagaço de cana-de-açúcar é governado pelo procedimento experimental avaliado. Dessa maneira, será feita uma avaliação mais detalhada dos parâmetros envolvidos no método, conforme ilustrado na Figura 8.19, correspondentes ao tempo de cura das amostras, relação água/cimento efetiva e porcentagem de substituição de CBC.

Figura 8.19 – Comportamento do Fator  $k$  de Eficácia Cimentante (Modelo de Ajuste Potencial) para Microconcretos em função da relação  $(a/c)_r$  e do teor de substituição de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados mostram que o fator de eficácia da CBC é fortemente influenciado pelo tempo de cura, teor de substituição e relação  $a/c$ , entretanto não demonstra um comportamento contínuo quanto aos três parâmetros.

Ao mesmo tempo, a Tabela 8.18 mostra que os valores de  $(a/c)x$  são sempre maiores que os valores de  $(a/c)r$ , isto é, pela interpretação física do fator  $k$ , conclui-se que os dados são sempre maiores que 0, corroborando os efeitos pozolânicos do material.

O comportamento do fator  $k$  com a relação  $a/c$  para um tempo de cura fixo não é linear, para ambas as substituições, devido o ajuste Potencial utilizado.

Para 15% de CBC, de modo geral, a eficácia cimentante da adição aos 7 e 28 dias não evidenciam grandes variações, entretanto um comportamento mais significativo no crescimento da eficácia cimentante está dos 28 para os 90 dias e dos 90 dias para 365 dias de cura. Essas misturas apresentam maiores valores de eficácia em relação às misturas com 30% de CBC, sendo esta diferença mais expressiva a longas idades de cura. Os dados de eficácia são bem próximos para 7, 28 e 180 dias de cura, apresentando valores em torno de 0,6, entretanto merece destaque os incrementos de  $k$ , acima de 1 aos 90 e 365 dias de cura.

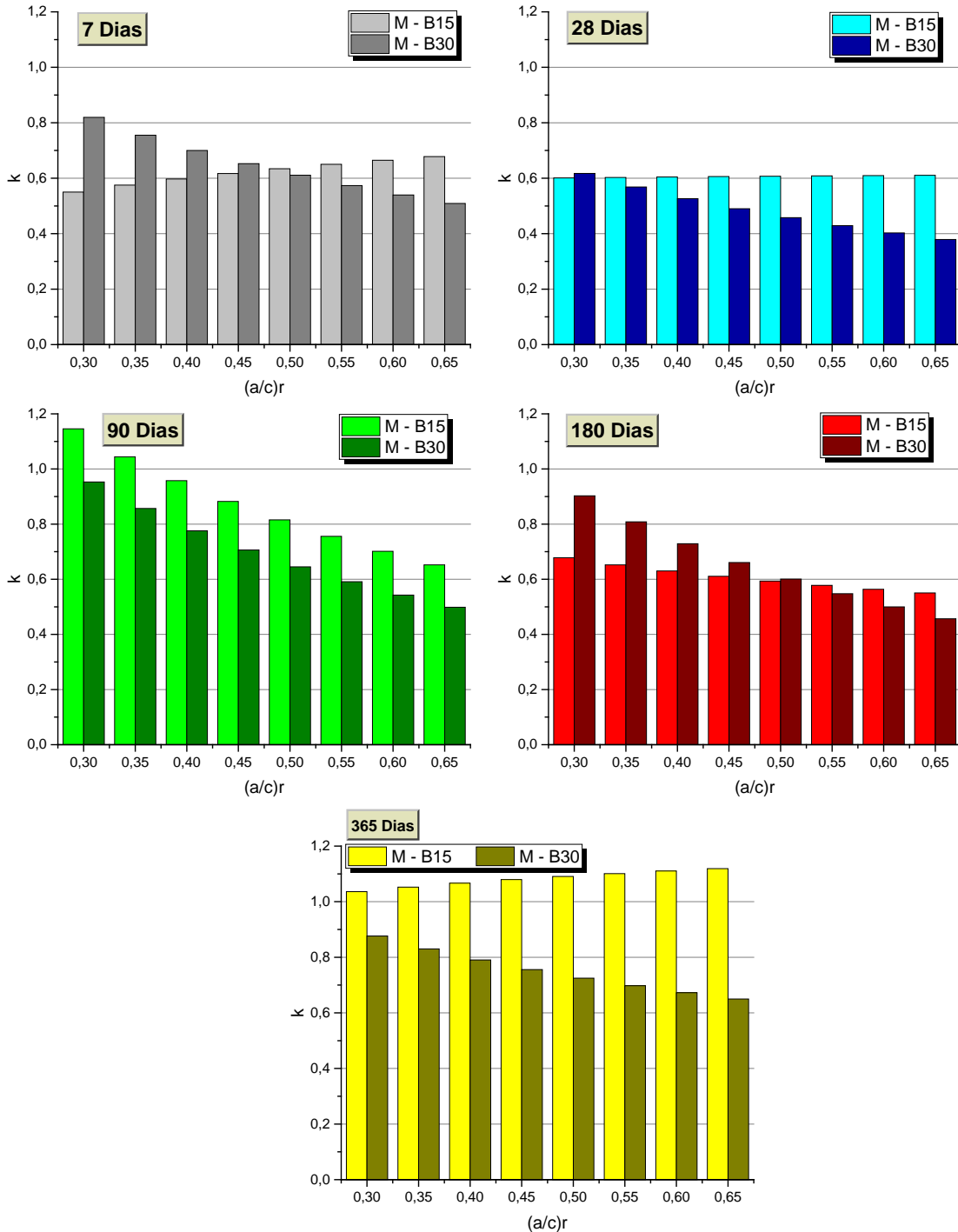
A substituição de 30% de cimento por CBC evidencia menores valores de fator  $k$  aos 28 dias de cura, em torno de 0,5, mostrando efetividade maior aos 7, 90 e 180 dias. Também merece destaque para o incremento de eficácia da CBC aos 365 dias de cura.

Percebe-se que os valores de  $k$  atingem seu máximo aos 90 dias de cura para ambos os teores de substituição e relações  $a/c$  baixas, e estes valores continuam próximos aos 365 dias de cura. Entretanto, para misturas com  $a/c$  médias e altas, fica evidente que a máxima atividade pozolânica da CBC está em 365 dias.

De modo geral, a CBC evidenciou coeficientes  $k$  de eficácia cimentante bastante expressivos (igual a 1,15) aos 90 dias de cura para relações água/cimento baixas. Yildirim et al. (2011) encontraram valores de  $k$  em até 0,75 para cinzas volantes de F, ao passo que Aponte (2010) relatou coeficientes de eficácia cimentante da cinza volante de classe F abaixo da unidade aos 7, 28 e 90 dias de cura, independente da relação água/cimento utilizada (0,4, 0,525 e 0,65).

A Figura 8.20 abaixo mostra uma comparação mais detalhada do fator  $k$  de eficácia em função do teor de substituição de cimento por CBC, seguida de uma discussão que relaciona os parâmetros “relação água/cimento”, “idade de cura”, “consumo de CBC”, além dos efeitos de “diluição e nucleação heterogênea”, culminando com os efeitos relacionados à “disponibilidade de portlandita”.

Figura 8.20 – Valores de Fator  $k$  (Modelo de Ajuste Potencial) para Microconcretos em função da relação  $(a/c)_r$  e do teor de substituição de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**8.5.6.1 Influência da relação água/cimento**

Inicialmente, observa-se que, para uma relação  $a/c$  fixa e baixa (0,3 e 0,35), os valores de  $k$  atingem seu máximo aos 90 e 365 dias de cura para ambos os teores de CBC, indicando que a máxima atividade pozolânica é obtida quando o consumo de cimento Portland é incrementado.

Este comportamento leva à conclusão de que não foram observados efeitos de compactação deficiente em função do consumo de água. Da mesma forma, é interessante mencionar que a trabalhabilidade das amostras foi garantida por meio da utilização de aditivos superplastificantes.

A partir da definição dos métodos de dosagem, infere-se que relações a/c baixas remetem um elevado consumo de cimento Portland nas misturas de microconcreto. Este comportamento também vem de encontro ao exposto por Aponte (2010), mostrando que os cimentos de pega rápida exercem um incremento da alcalinidade dos sistemas cimentícios, significando que esta elevação poderá forçar as cinzas a se reacionarem em maior velocidade.

Para 15% de substituição de cimento por CBC, merece destaque a redução brusca da eficácia aos 90 dias de cura com o aumento da relação a/c, ao passo que, para as demais idades, o incremento do consumo de água não alterou de maneira significativa os valores de eficácia.

Para 30% de substituição de cimento por CBC, pode-se observar que a eficácia cimentante depende de forma significativa da relação água/cimento, sendo que os valores de eficácia menores para relações a/c maiores. Da mesma forma que exposto por Payá et al. (2002), sugere-se que a efetividade dos produtos de hidratação seja reduzida em função do aumento do consumo de água nas misturas de microconcretos com CBC e o conseqüente aumento da porosidade das amostras, o que deixa claro a característica não hidráulica da CBC.

As análises mostram que inclusão de maiores consumos de cinza do bagaço de cana-de-açúcar evidencia um comportamento bastante similar em relação a outros materiais pozolânicos, como a cinza volante (BIJEN e SELST, 1993), sílica ativa (ALAEJOS e FERNÁNDEZ, 1999) e resíduo do craqueamento catalítico (PAYÁ et al., 2013), nas quais tiveram seus valores de eficácia reduzidos à medida em que as relações a/c foram incrementadas.

#### ***8.5.6.2 Influência da porcentagem de substituição de cimento por CBC***

Ao longo do tempo de cura, os valores de  $k$  para 15% de CBC são, em sua grande maioria, maiores que 1, nas quais se pode substituir cimento por um consumo menor de pozolana para se obter a mesma resistência mecânica, mantendo a mesma relação a/c.

Entretanto, os valores de  $k$  para 30% de CBC se mostram abaixo da unidade, nas quais se deve substituir cimento por um consumo maior de pozolana para alcançar uma mesma resistência mecânica, mantendo a mesma relação a/c.

Segundo Yeh (2013), enquanto que aos 28 dias de cura foram obtidos valores de  $k$  iguais a 1,36 e 0,80 para 10% e 30% de substituição de cimento por cinza volante, respectivamente,

fixando o teor de pozolana em 30% os valores de eficácia foram iguais a 0,60, 0,80, 0,96, 1,06 e 1,16 aos 7, 28, 90, 180 e 365 dias de cura.

Também pode-se perceber que, ao aumentar a porcentagem de CBC, a tendência é de que a eficácia seja mais tardia. De fato, para relações a/c iguais a 0,55, 0,6 e 0,65 das misturas com 30% de CBC, os valores de  $k$  obtidos aos 365 dias podem ser comparados aos valores obtidos aos 90 dias de cura para microconcretos com 15% de CBC.

Os efeitos de incremento de eficácia cimentante da CBC quando se incorpora menores teores de substituição também foi verificado por Aponte (2010) e Sanjuán, Piñeiro e Rodríguez (2011), ao incorporar cinzas volantes de classe F e escória granulada de alto-forno em concretos de cimento Portland, respectivamente.

Os efeitos da redução da eficácia da CBC em relação ao incremento no seu consumo podem estar associados ao seu caráter predominantemente não vítreo, evidenciado nos ensaios de difração de raios X. De fato, segundo Pinheiro (2015) e Cordeiro e Kurtis (2017), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar parece ser altamente sensível às mudanças de suas propriedades mecânicas quando se altera sua granulometria, já que apresenta natureza parcialmente cristalina de sua sílica, pelo alto conteúdo de quartzo.

Isso indica que apenas uma parcela da CBC pode participar das reações pozolânicas, ainda que certa parte do material continua não reagindo mesmo após longos períodos de cura.

### **8.5.6.3 Influência do tempo de cura**

De maneira geral, se pode observar que a resistência mecânica dos microconcretos constituídos de CBC e a eficácia cimentante da pozolana apresenta comportamentos distintos em relação a curtos tempos de cura (7 e 28 dias) e elevados tempos de cura (90 e 365 dias). Isso mostra que a idade exerce grande influência na atividade pozolânica da CBC, e que a fixação de portlandita por parte da CBC continua sendo efetiva após longos períodos de cura.

Merece destaque a idade de 180 dias de cura, nas quais foram constatados baixos valores de eficácia cimentante da CBC, ainda abaixo dos valores obtidos aos 90 e 365 dias.

É evidente que o fator  $k$  de eficácia sofre influências do tempo de cura e relação a/c das misturas. Independentemente do teor de substituição de cimento por CBC, é visto que a eficácia da CBC se torna mais expressiva aos 90 dias de cura para misturas com relação a/c baixas, enquanto que os valores de  $k$  são mais expressivos aos 365 dias de cura para misturas com relação a/c alta.

De maneira geral, percebe-se que todos os valores de eficácia da CBC são menores aos 28 dias, para todas as relações a/c e teores de substituição estudados. O mesmo efeito foi



observado nas propriedades mecânicas das argamassas e microconcretos constituídos de CBC, em que os índices menos expressivos de ganho de resistência se deu aos 28 dias.

Ainda assim, aos 7 dias de cura, para ambos os teores de CBC, os valores de  $k$  superam os obtidos aos 28 dias, igualando-se aos coeficientes obtidos aos 90 dias de cura. Neste caso, sabendo que a CBC tem mostrado sua potencialidade pozolânica ao longo do tempo de cura, é importante levar em consideração os efeitos físicos nas idades iniciais.

#### ***8.5.6.4 Efeitos de diluição e nucleação***

A constatação anterior de que os valores de eficácia cimentante da CBC foram bem pronunciados aos 7 dias de cura e para maiores consumos de cinza leva à análise dos efeitos físicos nas idades iniciais.

Segundo Aponte (2010), o tamanho de partículas das cinzas volantes não é um fator que afete significativamente os valores de eficácia cimentante quando essas se encontram em meios de alta alcalinidade. Sabendo que os dados granulométricos da CBC evidenciaram diâmetros de partículas superiores aos do cimento CP V-ARI, se dará maior atenção aos efeitos de diluição e nucleação.

Aos 7 dias de cura e para misturas com a/c baixos, os efeitos de nucleação parecem ser expressivos, de forma que o maior consumo de CBC proporcionou valores mais efetivos de eficácia cimentante. Enquanto que Aponte (2010) verificaram os efeitos de nucleação para altas porcentagens de cinza volante em concretos, Lawrence, Cyr e Ringot (2003) mencionam que este efeito pode ser bem mais pronunciado quando se incrementa porcentagens ótimas de adições minerais. Além disso, altas superfícies específicas Blaine (acima de 100 m<sup>2</sup>/kg) favorecem os efeitos de nucleação (LAWRENCE, CYR e RINGOT, 2003; CORDEIRO e KURTIS, 2017).

Nos efeitos de diluição, a incorporação de uma adição mineral diminui a quantidade de cimento, gerando uma queda na resistência que é proporcional à quantidade de adição incorporada. Assim como observado nos resultados de ganho de resistência (SG%) dos microconcretos, este efeito também se mostrou pronunciado na avaliação da eficácia cimentante da CBC para misturas com relação a/c alta; de fato, altos consumos de pozolana levaram à redução do consumo de cimento Portland, o que induziu ao aumento da relação a/c efetiva das misturas.

#### 8.5.6.5 *Influência da portlandita disponível para as reações*

Ao longo do tempo de cura, os resultados de difração de raios X mostrados na Parte 2 deste capítulo evidenciaram a redução dos picos de Portlandita e crescimento dos picos de silicatos de cálcio hidratados em pastas de cal/CBC e cimento/CBC. Além disso, os resultados das análises de termogravimetria evidenciaram que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar também pode indicar picos relacionados à formação dos silicatos de cálcio hidratados em pastas de cal/pozolana e cimento/pozolana.

Quando se avalia o comportamento dos resultados a longos períodos de hidratação, percebe-se que a menor porcentagem de CBC nas misturas de microconcretos proporciona maior eficácia cimentante para a adição mineral. Neste quesito, a disponibilidade de portlandita para a efetivação das reações parece descrever o comportamento frente aos consumos de CBC e cimento Portland nas misturas de microconcreto.

Para os traços com relação a/c elevada, percebe-se uma grande influência no crescimento da eficácia cimentante da CBC dos 90 para os 365 dias, independentemente da porcentagem de substituição. Referente a estas idades, foram constatados aumentos de 72,3% e 30% nos valores de  $k$ , para 15% CBC e 30% CBC, respectivamente ( $k$  variou de 0,65 a 1,12 para 15% CBC e de 0,50 a 0,65 para 30% CBC). Neste sentido, corrobora-se o efeito de maior disponibilidade de portlandita para que a CBC continue reagindo após longos períodos de cura.

Assim como discutido na Parte 3, o sistema resultante de poros capilares causados pela inclusão de CBC de formato irregular e textura rugosa parece evidenciar maior retenção de água, que pode estar disponível para a hidratação a idades avançadas. Entretanto, maiores consumos de CBC e água e menores consumos de cimento para os traços com 30% pode ter proporcionado uma redução no ganho de eficácia, em relação às dosagens com 15% de CBC.

Gopalan (1995) verificou um incremento substancial nos valores de  $k$  entre as idades de 28 e 90 dias para traços com menor consumo de cimento, mostrando um melhor efeito das reações pozolânicas devido a adição de cinza volante para maiores relações a/c. Por exemplo, para concretos com cinza volante de 25 MPa,  $k$  variou de 0,56 a 1,37 entre os 28 e 91 dias de idade, respectivamente, ao passo que, para concretos de 50 MPa,  $k$  variou de 0,31 a 0,66 nas mesmas idades de cura.

Quando se avalia os coeficientes de eficácia cimentante da CBC para misturas com relação a/c baixa, se percebe que a grande influência no crescimento de  $k$  está entre os 28 e 90 dias, o que leva a deferir que os efeitos de alcalinidade são mais expressivos pelo incremento no consumo de cimento Portland. Entre as idades de 28 e 90 dias de cura, ao passo que as misturas com 15% de CBC levaram ao aumento de 91,7% dos valores de eficácia, as misturas

com 30% conduziram a incrementos de 53,2% ( $k$  variou de 0,6 a 1,15 para 15% CBC e de 0,62 a 0,95 para 30% CBC). Assim como as misturas com elevada relação a/c, os efeitos de disponibilidade de portlandita ao longo do tempo de cura podem estar intrinsicamente relacionados com o consumo de cimento substituído nas misturas de microconcreto.

Além disso, tanto para misturas com relações a/c baixas quanto altas, é evidente que a inclusão de 30% de CBC proporcionou taxas no ganho de eficácia menores em relação às misturas com 15% de CBC, corroborando os princípios de que apenas uma parcela da cinza pode participar das reações pozolânicas.

## 8.6 CONCLUSÕES

Quando se avalia o primeiro modelo para a obtenção da eficácia cimentante da CBC, são apresentadas as seguintes conclusões:

- A inserção de 15% de CBC em relação à massa de cimento proporciona uma maior aproximação dos valores de resistência à compressão em relação às misturas de microconcretos controle. Além disso, a inserção do material pozolânico tende a aproximar os valores de resistência à compressão em relação às misturas controle para idades mais tardias.
- Os modelos de ajuste das curvas  $R_c$  x a/c exercem forte influência na obtenção do fator  $k$  de eficácia da CBC, o que conduziu à utilização do modelo Potencial.
- Os dados mostram que o fator de eficácia da CBC está sempre acima de zero, o que não demonstra o caráter inerte do material; além disso, os parâmetros “relação água/cimento”, “idade de cura”, “consumo de CBC”, além dos efeitos de “diluição e nucleação heterogênea” e “disponibilidade de portlandita” podem descrever os comportamentos obtidos.
- De modo geral, o comportamento observado nos resultados das propriedades mecânicas, de eficácia cimentante e microestruturais pode novamente estar associado à baixa fração de silício amorfo ou fase vítrea da CBC, indicando que apenas uma parcela do material participa das reações pozolânicas e que se existe um teor ótimo de substituição de pozolana em relação à massa de cimento Portland, dado em 15% para as condições definidas nesta Parte.

## Parte 5

### *O Coeficiente $k$ de Eficácia Cimentante da CBC por meio da produção de Microconcretos e em termos de Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de CBC*

Outra técnica normalmente utilizada para avaliar a efetividade das adições minerais em concretos baseia-se na razão entre o consumo de cimento substituído e o consumo de CBC adicionado, para misturas com resistências mecânicas similares (HO e LEWIS, 1985; GOPALAN, 1995).

Dessa forma, pretende-se verificar a efetividade da CBC avaliando se o consumo de pozolana a ser adicionado será maior, menor ou similar ao consumo de cimento reduzido, para manter a mesma resistência mecânica dos traços sem adição (Controle).

Da mesma forma do método empregado em termos de resistência à compressão x fator água/cimento, este método leva em conta os valores de resistência mecânica à compressão e as particularidades das dosagens, como consumo de material, relação água/material cimentante e idade de cura, evidenciando mais uma vez não obter um único valor de eficácia, e sim valores que dependem desses diversos parâmetros.

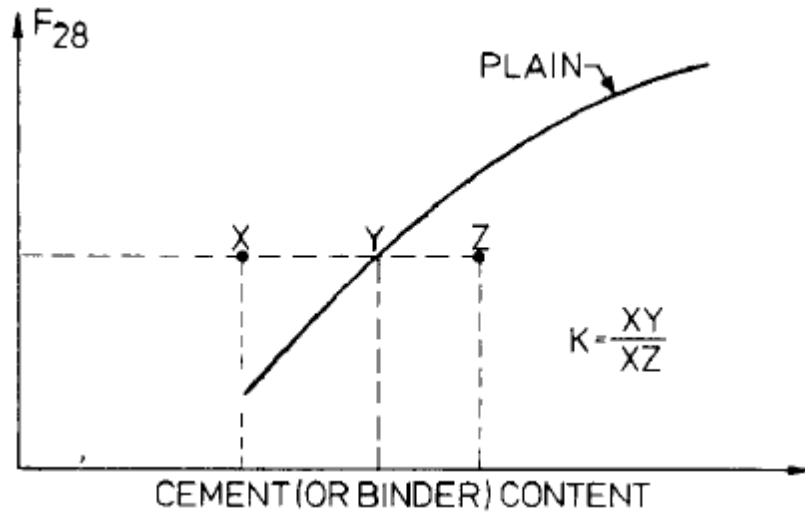
#### **9.1 MODELO DE CÁLCULO DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE**

Segundo Ho e Lewis (1985), o fator de eficácia cimentante  $k$  pode ser determinado graficamente, como mostra a Figura 9.1. A curva obtida mostra a relação entre a resistência mecânica à compressão de um concreto sem cinza volante (controle) à uma idade de cura específica, frente ao consumo de aglomerante registrado no eixo x. Partindo de um valor fixo de resistência mecânica à compressão e para a produção de uma nova mistura com adição mineral, obtém-se os valores de X e Z, que representam, respectivamente, o consumo de cimento e material cimentante.

Sendo assim, em comparação com a mistura controle, a distância XY representa o consumo de cimento substituído, enquanto que a distância XZ remete o consumo de cinza volante a ser incrementada. Portanto o coeficiente de eficácia cimentante ( $k$ ) é dado por:

$$k = \frac{XY}{XZ} \quad (9.1)$$

Figura 9.1 – Determinação do coeficiente de eficácia cimentante ( $k$ ) da cinza volante.



Por exemplo, para um concreto que apresente resistência de 30 MPa aos 28 dias de idade, é necessário um consumo de Cimento Portland de 280 kg/m<sup>3</sup> (ponto Y).

Um concreto com o mesmo tipo de cimento, mas com um certo consumo de cinza volante, para possuir mesma resistência mecânica à compressão aos 28 dias de idade, necessitaria de 245 kg/m<sup>3</sup> de Cimento Portland (ponto X), somados a 61 kg/m<sup>3</sup> de cinza volante. Neste caso, para este concreto, seria necessário um consumo total de 306 kg/m<sup>3</sup> de material cimentante (ponto Z), o que conduziria ao valor do fator de eficácia  $k$ :

$$k = \frac{35}{61} = 0,57 \quad (9.2)$$

A partir do modelo apresentado acima, é apresentada novamente a definição de  $k$ , que se estabelece a similaridade das resistências mecânicas à compressão das misturas sem adição e com adição ( $R_{c,Controle} = R_{c,Adição}$ ). Para isso, a relação proposta por Smith (1967) e a norma BS EN-206:2013, que leva em conta que a resistência mecânica e a relação água/cimento de um concreto convencional, também pode ser válida para concretos com adição de cinza volante, modificando-se o consumo de cimento pelo consumo efetivo de materiais cimentícios. Sendo assim, o valor do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante é obtido pela expressão:

$$\left(\frac{a_1}{c_1}\right)_{Controle} = \left(\frac{a_2}{c_2+k*p}\right)_{Pozolana} \quad (9.3)$$

Em que:

- $a_1$  é o consumo de água da mistura sem adição (kg/m<sup>3</sup>);
- $a_2$  é o consumo de água da mistura com adição (kg/m<sup>3</sup>);
- $c_1$  é o consumo de cimento da mistura sem adição (kg/m<sup>3</sup>);

- $c_2$  é o consumo de cimento da mistura com adição ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $p$  é o consumo de pozolana ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Para obter uma trabalhabilidade específica das amostras de concretos, considera-se que o consumo de água das amostras sem e com adição deve ser o mesmo ( $a_1 = a_2$ ). Nestas condições, tem-se que:

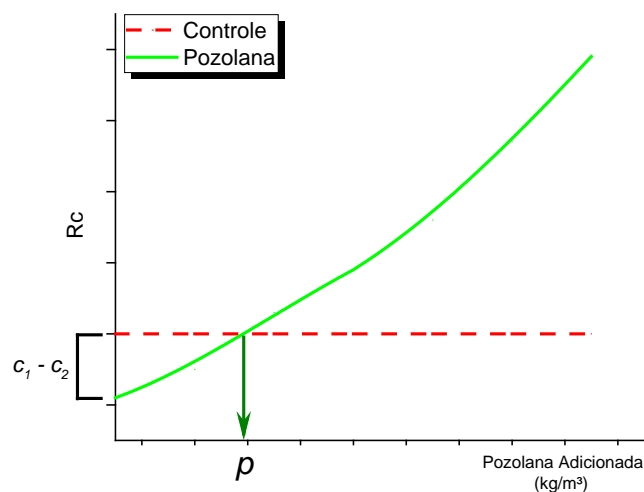
$$c_{1_{\text{Controle}}} = (c_2 + k * p)_{\text{Pozolana}} \quad (9.4)$$

Deixando  $k$  em evidência, obtém-se a expressão:

$$k = \frac{c_1 - c_2}{p} \quad (9.5)$$

Sendo assim, o método proposto neste capítulo consiste inicialmente em estabelecer o consumo de cimento Portland a ser reduzido ( $c_1 - c_2$ ), para então atribuir incrementos no consumo de CBC, mantendo-se a relação água/cimento constante. Um esquema geral deste método pode ser interpretado pela Figura 9.2 abaixo, que tem como base o valor da resistência mecânica à compressão da mistura controle e a curva de resistência quando se incrementa o consumo de pozolana. Se observa que existe uma redução da resistência mecânica à compressão em relação à mistura controle, quando se reduz o consumo de cimento; a partir deste ponto, verifica-se então e o incremento das resistências mecânicas quando se adiciona o material pozolânico.

Figura 9.2 – Modelo Gráfico para determinação do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Sendo assim, o consumo de pozolana  $p$  será obtido pela intersecção da reta que fornece o valor de resistência mecânica à compressão dos traços controle com a curva que representa os valores de resistência das misturas com incrementos de pozolana. Aplicando-se a equação 9.5, obtém-se o valor do fator  $k$  de eficácia cimentante.

## **9.2 DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MICROCONCRETOS EM RELAÇÃO AO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND REDUZIDO E CBC ADICIONADO**

### **9.2.1 Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Microconcretos**

Inicialmente, foram definidos para este método três grupos de dosagem sem adição de CBC (Controle), já discriminados na Parte 4. Sendo assim, foram selecionadas as dosagens com relações a/cm baixo (0,3), a/cm médios (0,5) e a/cm alto (0,65), sendo definidas as misturas:

- M – C – 0,3
- M – C – 0,5
- M – C – 0,65

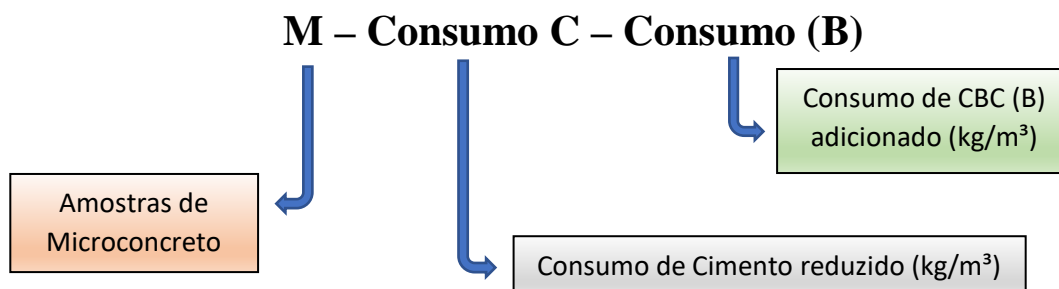
A partir dos traços controle, definiu-se que 10% do consumo de Cimento Portland seria reduzido a partir do consumo de cimento da mistura controle. Sendo assim, observou-se uma redução de 54 kg/m<sup>3</sup>, 36 kg/m<sup>3</sup> e 29 kg/m<sup>3</sup> para os traços M – C – 0,3, M – C – 0,5 e M – C – 0,65, respectivamente, gerando os grupos de misturas definidos em M – 54C – B, M – 36C – B, M – 29C – B.

A partir da obtenção dos traços com cimento Portland reduzido, se propôs a formulação das misturas com vários incrementos no consumo de CBC, de tal modo que o consumo de cimento Portland e de água nas misturas se manteve constante.

O consumo de CBC adicionado foi então definido em função dos valores de fator  $k$  obtidos na Parte 4 ( $k = 0,38$  a  $1,15$ ), juntamente com a multiplicidade dos consumos de cimento Portland reduzido (4x a menos ou a mais). De fato, por meio da Equação 9.1, para consumos de CBC reduzidos à quarta parte do consumo de Cimento Portland, nos fornece um fator de eficácia cimentante  $k = 4$ , bem como, quando incrementado 4 vezes, nos fornece um valor de  $k = 0,25$ .

A nomenclatura utilizada para designar as misturas se apresenta de forma:

Figura 9.3 - Nomenclatura utilizada para designar as misturas de microconcreto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Utilizou-se como base o método de dosagem descrito na Parte 4, nas quais utiliza as formulações propostas por Helene e Terzian (1992) e O'Reilly Díaz (1998).

As misturas de Microconcreto foram elaboradas utilizando os materiais:

- Aglomerante: Cimento Portland CP V-ARI;
- Agregados Miúdos: Areia Média Natural e Pó de Pedra;
- Agregado Graúdo: Brita 0;
- Água potável;
- Pozolana: Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBC);
- Aditivo Superplastificante para manter a trabalhabilidade.

Além disso, o método de dosagem proposto por Helene e Terzian (1992) leva em consideração que os consumos de materiais são obtidos para se produzir 1 m<sup>3</sup> de material, o que fez com que as reduções no consumo de Cimento Portland e incrementos no consumo de CBC fossem corrigidas por meio de alterações no consumo de areia. Isso deixa claro em que se manteve constante os consumos de brita 0, pedrisco e água (kg/m<sup>3</sup>), sendo que esta constância da água ( $a_1 = a_2$ ) é uma condição essencial para este método.

As correções nos consumos de cimento, CBC e areia, no geral, não provocaram alterações significativas no teor de argamassa seca ( $\alpha$ ) das misturas, o que poderia causar mais uma influência nos parâmetros do fator  $k$  em função de alterações na porosidade dos microconcretos pela falta de argamassa ou alta demanda de água pelo excesso dessa.

Diferentemente do primeiro método, os dados das tabelas seguintes mostram que, quando se reduz o consumo de cimento, para manter o mesmo consumo de água, eleva-se a relação  $a/cm$ , ao passo que quando se incrementa o consumo de CBC, este valor de  $a/cm$  é reduzido.

As dosagens dos Microconcretos estão definidas nas Tabelas 9.1 a 9.3 abaixo.



Tabela 9.1 – Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,3$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 54C – B).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cimento	Areia	B O	Pó P.	Água	CBC
M–C–0,3	3,500	0,5300	0,3000	0,000	537,98	745,10	682,70	455,13	161,39	0,00
M–54C–0 B	3,985	0,5284	0,3340	0,000	484,01	790,91	682,72	455,15	161,66	0,00
M–54C–13,5 B	3,852	0,5287	0,3246	2,713	484,07	778,74	682,73	455,15	161,51	13,50
M–54C–27 B	3,726	0,5289	0,3160	5,283	484,05	766,27	682,75	455,16	161,49	27,00
M–54C–40,5 B	3,606	0,5290	0,3080	7,722	484,01	753,66	682,74	455,16	161,55	40,50
M–54C–54 B	3,493	0,5293	0,3000	10,037	484,00	741,60	682,71	455,14	161,40	54,00
M–54C–108 B	3,090	0,5301	0,2727	18,246	484,00	691,47	682,70	455,13	161,45	108,02
M–54C–162 B	2,754	0,5308	0,2500	25,077	484,02	641,26	682,73	455,16	161,51	162,00
M–54C–216 B	2,470	0,5316	0,2307	30,858	484,00	591,34	682,70	455,13	161,49	216,01

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9.2 – Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 36C – B).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cimento	Areia	B O	Pó P.	Água	CBC
M–C–0,5	5,500	0,5300	0,5000	0,000	360,20	880,68	660,24	440,16	180,10	0,00
M–36C–0 B	6,210	0,5291	0,5560	0,000	324,01	912,03	660,05	440,03	180,15	0,00
M–36C–9 B	6,015	0,5293	0,5403	2,710	324,14	903,90	660,06	440,04	180,01	9,03
M–36C–18 B	5,833	0,5293	0,5268	5,270	324,04	895,09	660,11	440,07	180,20	18,03
M–36C–27 B	5,661	0,5295	0,5130	7,695	324,03	887,09	660,10	440,07	180,09	27,01
M–36C–36 B	5,498	0,5297	0,5000	10,000	324,00	879,08	660,07	440,05	180,00	36,00
M–36C–72 B	4,910	0,5301	0,4548	18,190	324,11	845,00	660,13	440,09	180,18	72,06
M–36C–108 B	4,425	0,5307	0,4165	25,000	324,13	812,08	660,18	440,12	180,00	108,04
M–36C–144 B	4,013	0,5312	0,3850	30,770	324,07	778,41	660,05	440,03	180,22	144,03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9.3 – Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,65$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 29C – B).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cimento	Areia	B O	Pó P.	Água	CBC
M–C–0,65	7,000	0,5300	0,6500	0,000	288,66	935,24	651,21	434,14	187,63	0,00
M–29C–0 B	7,877	0,5291	0,7230	0,000	259,66	959,91	651,25	434,17	187,73	0,00
M–29C–7,25 B	7,640	0,5292	0,7036	2,718	259,58	953,22	651,25	434,17	187,75	7,25
M–29C–14,5 B	7,414	0,5293	0,6850	5,288	259,58	946,51	651,27	434,18	187,74	14,49
M–29C–21,75 B	7,200	0,5295	0,6670	7,730	259,57	940,14	651,21	434,14	187,64	21,75
M–29C–29 B	6,996	0,5296	0,6500	10,050	259,58	933,48	651,28	434,18	187,58	29,00
M–29C–58 B	6,268	0,5301	0,5902	18,260	259,76	906,59	651,20	434,14	187,56	58,03
M–29C–87 B	5,664	0,5304	0,5410	25,130	259,71	879,21	651,33	434,22	187,66	87,17
M–29C–116 B	5,159	0,5308	0,5000	30,890	259,58	852,33	651,26	434,17	187,80	116,03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para efeitos de comparação das misturas com 10% no consumo de Cimento reduzido, posteriormente se definiu um consumo maior de redução de Cimento Portland para as misturas com relação  $a/cm = 0,5$  (20% e 30% de redução, correspondente a  $72 \text{ kg/m}^3$  e  $108 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente). As Tabelas 9.4 e 9.5 mostram as dosagens dos traços, que são referentes aos grupos de Misturas M – 72C – B e M – 108C – B.

Tabela 9.4 – Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 20% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 72C – B).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos ( $\text{kg/m}^3$ )					
					Cimento	Areia	B O	Pó P.	Água	CBC
M–C–0,5	5,500	0,5300	0,5000	0,000	360,20	880,68	660,24	440,16	180,10	0,00
M–72C–0 B	7,090	0,5281	0,6250	0,000	288,17	942,99	660,09	440,06	180,11	0,00
M–72C–18 B	6,615	0,5284	0,588	5,900	288,25	926,24	660,04	440,02	180,12	18,07
M–72C–36 B	6,201	0,5286	0,5560	11,105	288,09	909,53	660,07	440,05	180,19	35,99
M–72C–54 B	5,825	0,5288	0,5267	15,780	288,15	892,65	660,17	440,11	180,20	53,99
M–72C–72 B	5,488	0,5292	0,5000	20,000	288,13	876,42	660,07	440,05	180,08	72,03
M–72C–144 B	4,417	0,5302	0,4165	33,320	288,30	809,41	660,19	440,12	180,08	144,06
M–72C–216 B	3,654	0,5313	0,3570	42,850	288,26	742,80	660,14	440,09	180,07	216,13
M–72C–288 B	3,081	0,5323	0,3125	50,000	288,23	675,80	660,17	440,11	180,14	288,23

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9.5 – Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 30% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 108C – B).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos ( $\text{kg/m}^3$ )					
					Cimento	Areia	B O	Pó P.	Água	CBC
M–C–0,5	5,500	0,5300	0,5000	0,000	360,20	880,68	660,24	440,16	180,10	0,00
M–108C–0 B	8,224	0,5271	0,7140	0,000	252,21	974,04	660,10	440,07	180,08	0,00
M–108C–27 B	7,337	0,5275	0,6450	9,670	252,27	948,90	660,07	440,05	180,13	27,01
M–108C–54 B	6,609	0,5279	0,5880	17,65	252,21	923,95	660,11	440,07	180,09	54,06
M–108C–81 B	5,998	0,5283	0,5405	24,310	252,26	898,86	660,08	440,05	180,14	81,02
M–108C–108 B	5,476	0,5286	0,5000	30,000	252,30	873,38	660,18	440,12	180,21	108,13
M–108C–216 B	4,002	0,5303	0,3845	46,130	252,28	773,90	660,15	440,10	180,06	216,03
M–108C–324 B	3,078	0,5318	0,3128	56,230	252,22	673,45	660,15	440,10	180,25	324,03
M–108C–432 B	2,446	0,5335	0,2632	63,140	252,25	573,79	660,08	440,05	180,12	432,10

Fonte: Elaboração do próprio autor.

## 9.2.2 Trabalhabilidade

Durante o processo de moldagem dos corpos de prova de Microconcretos, também foi analisada a trabalhabilidade das misturas, de forma a se conhecer o efeito do aditivo superplastificante e da CBC sobre a consistência dos microconcretos. Para isso, foram realizados os ensaios de Mini-Abatimento (Mini-Slump) e Mesa de Consistência (Flow Table);

mantendo-se o consumo de água constante, avaliou-se a porcentagem de substituição de Aditivo Superplastificante em relação à massa deste com a massa de cimento Portland, para garantir o Mini-Slump de  $40 \pm 10$  mm uma abertura de Consistência de  $290 \pm 10$  mm.

Os resultados referentes à porcentagem de Aditivo Superplastificante, Mini-Slump e Mesa de Consistência (Abertura), para as misturas definidas nesta seção, são mostrados nas Tabelas 9.6.

Tabela 9.6 – Trabalhabilidade de Microconcretos com Adição de Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar para diferentes relações a/cm.

(a) Traço Controle com a/cm = 0,3, demais traços com 10% de redução no consumo de Cimento e adição de CBC (M – 54C – B)					(b) Traço Controle com a/cm = 0,5, demais traços com 10% de redução no consumo de Cimento e adição de CBC (M – 36C – B)				
Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)	Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M–C–0,3	0,3000	0,93	51,0	300,0	M–C–0,5	0,5000	0,32	37,0	290,0
M–54C–0 B	0,3340	0,68	51,0	303,0	M–36C–0 B	0,5560	0,31	40,0	280,0
M–54C–13,5 B	0,3246	0,63	43,0	280,0	M–36C–9 B	0,5403	0,36	43,0	290,0
M–54C–27 B	0,3160	0,67	47,0	292,0	M–36C–18 B	0,5268	0,35	42,0	290,0
M–54C–40,5 B	0,3080	0,66	50,0	279,0	M–36C–27 B	0,5130	0,35	49,0	300,0
M–54C–54 B	0,3000	0,72	51,0	279,0	M–36C–36 B	0,5000	0,39	47,0	301,0
M–54C–108 B	0,2727	0,89	51,0	279,0	M–36C–72 B	0,4548	0,42	40,0	282,0
M–54C–162 B	0,2500	1,25	50,0	275,0	M–36C–108 B	0,4165	0,47	39,0	280,0
M–54C–216 B	0,2307	1,78	52,0	275,0	M–36C–144 B	0,3850	0,64	43,0	290,0

(c) Traço Controle com a/cm = 0,65, demais traços com 10% de redução no consumo de Cimento e adição de CBC (M – 29C – B)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M–C–0,65	0,6500	0,29	38,0	296,0
M–29C–0 B	0,7230	0,27	39,0	298,0
M–29C–7,25 B	0,7036	0,39	43,0	301,0
M–29C–14,5 B	0,6850	0,44	39,0	293,0
M–29C–21,75 B	0,6670	0,45	47,0	303,0
M–29C–29 B	0,6500	0,48	39,0	293,0
M–29C–58 B	0,5902	0,49	40,0	293,0
M–29C–87 B	0,5410	0,50	40,0	297,0
M–29C–116 B	0,5000	0,57	42,0	283,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9.6 (Continuação) – Trabalhabilidade de Microconcretos com Adição de Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar para diferentes % de redução de cimento Portland.

(d) Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 20% de redução no consumo de Cimento e adição de CBC (M – 72C – B)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M–C–0,5	0,5000	0,32	37,0	290,0
M–72C–0 B	0,6250	0,50	40,0	285,0
M–72C–18 B	0,5880	0,50	31,0	285,0
M–72C–36 B	0,5560	0,50	45,0	295,0
M–72C–54 B	0,5267	0,50	34,0	282,0
M–72C–72 B	0,5000	0,62	32,0	280,0
M–72C–144 B	0,4165	0,76	45,0	280,0
M–72C–216 B	0,3570	0,94	42,0	280,0
M–72C–288 B	0,3125	1,28	50,0	262,0

(e) Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 30% de redução no consumo de Cimento e adição de CBC (M – 108C – B)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M–C–0,5	0,5000	0,32	37,0	290,0
M–108C–0 B	0,7140	0,50	42,0	288,0
M–108C–27 B	0,6450	0,61	40,0	285,0
M–108C–54 B	0,5880	0,63	43,0	295,0
M–108C–81 B	0,5405	0,76	47,0	300,0
M–108C–108 B	0,5000	0,78	50,0	295,0
M–108C–216 B	0,3845	0,85	48,0	280,0
M–108C–324 B	0,3128	1,45	50,0	270,0
M–108C–432 B	0,2632	1,97	52,0	240,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Inicialmente, constata-se que, para todas as dosagens com adição de CBC, a relação  $a/cm$  tem forte influência na porcentagem de aditivo. Em relação aos traços controle, pode-se constatar que as misturas com baixos consumos de CBC apresentaram teores ligeiramente superiores de aditivo. Entretanto, porcentagens altas de superplastificante foram observadas para altos consumos de CBC (de até 2% para o traço M – 108C – 432 B).

De maneira geral, não foram constatadas presença de segregação e exsudação nas misturas. As porcentagens de superplastificante definidas proporcionaram ótima correlação entre os parâmetros definidos para a Mesa de Consistência e Mini-Slump, estando entre os limites estabelecidos de  $40 \pm 10$  mm e  $290 \pm 10$  mm, respectivamente.

Entretanto, pode-se observar que, para as misturas com consumo muito elevado de CBC e relação a/cm muito baixa, não foi possível satisfazer os dois parâmetros estabelecidos ao mesmo tempo. De fato, para os traços M – 54C – 162 B, M – 54C – 216 B, M – 72C – 288 B, M – 108C – 324 B e M – 108C – 432 B, com consumos de CBC acima de 162 kg/m<sup>3</sup> e a/cm abaixo de 0,3, alcançaram-se os valores de Mini-Slump, entretanto menores valores de abertura foram obtidos.

De maneira geral, todos os traços do grupo M – 54C – B mantiveram valores altos de Mini-Slump (da ordem de 50 mm) para conseguir manter valores mínimos aceitáveis de Abertura de Consistência (280 mm).

A partir dos dados obtidos, se decidiu correlacionar a porcentagem de aditivo superplastificante com o consumo de CBC ( $p$ ) adicionado nas misturas, por meio da análise de regressão das curvas experimentais. Para maior precisão dos parâmetros de ajustes, se alterou o consumo de CBC de kg/m<sup>3</sup> para g/cm<sup>3</sup>. Sendo assim, o modelo que melhor descreve os dados experimentais é o Polinomial de Ordem 3, sendo que os parâmetros de ajuste (A, B, C e D) das curvas teóricas estão listados na Tabela 9.7, de acordo com a Equação 9.6:

$$\% \text{ Superp.} = (A * p^3) + (B * p^2) + (C * p) + D \quad (9.6)$$

Tabela 9.7 – Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Microconcretos em função da porcentagem de Superplastificante e Consumo de CBC.

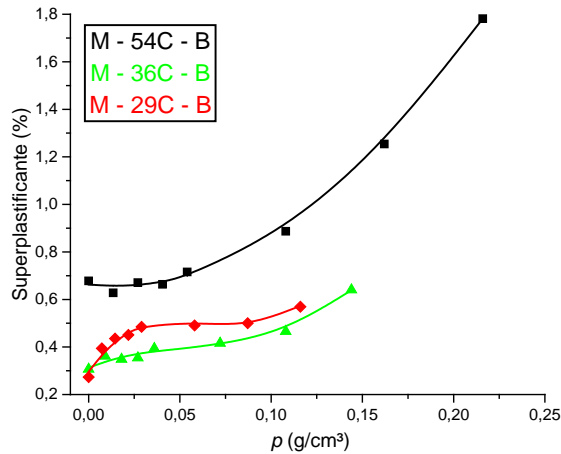
Mistura	A	B	C	D	R <sup>2</sup>
M-54C-B	4,286	26,832	-0,816	0,663	0,999
M-36C-B	270,250	-45,576	3,221	0,314	0,985
M-29C-B	949,690	-186,060	11,191	0,296	0,965
M-72C-B	4,865	4,674	1,003	0,480	0,988
M-108C-B	15,676	-4,058	2,202	0,536	0,981

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados acima mostram que as linhas de tendência utilizadas para ajustar os dados experimentais representam satisfatoriamente o comportamento da porcentagem de superplastificante em relação ao consumo de CBC adicionado em microconcretos, com valores de R<sup>2</sup> acima de 0,981 para traços com a/cm médio e baixo. Esta correlação se mostrou pouco menor apenas para traços com a/cm alto (0,65), com valor de R<sup>2</sup> = 0,965.

Por meio das equações de ajuste, a evolução da porcentagem de aditivo superplastificante em relação ao consumo de CBC para relações a/cm baixas (0,3), médias (0,5) e altas (0,65), e redução de 10% do consumo de cimento Portland é apresentada na Figura 9.4.

Figura 9.4 – Porcentagem de aditivo Superplastificante em função do consumo de CBC para manter a mesma trabalhabilidade de Microconcretos do grupo de misturas M – 54C – B, M – 36C – B e M – 29C – B.

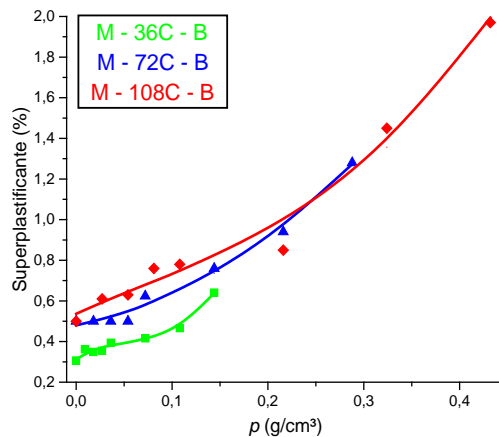


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir da figura acima, constata-se que, para todas as dosagens com redução de 10% de cimento e adição de CBC, maiores porcentagens de aditivo foram observadas para traços com relação a/cm menor (0,3), conduzindo a reduções do teor de superplastificante para as dosagens com a/cm médio (0,5) e a/cm alto (0,65). Entretanto, as misturas com o fator a/cm elevado (M – 29C – B) apresentaram um comportamento distinto em relação às demais; para aumentos no consumo de CBC, se requer um teor mais elevado de aditivo em relação aos traços com a/cm médio.

Atribuindo-se a relação a/cm média (0,5) constante para as misturas controle, pode-se verificar, de acordo com a Figura 9.5, a evolução da porcentagem de aditivo superplastificante em relação ao consumo de CBC para 10%, 20% e 30% de redução no consumo de Cimento Portland.

Figura 9.5 – Porcentagem de aditivo Superplastificante em função do consumo de CBC para manter a mesma trabalhabilidade de Microconcretos para os grupos de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em relação à Tabela 9.6 (d) e (e), à medida em que se reduz o consumo de cimento e incrementa o consumo de CBC, a porcentagem de superplastificante é maior. Se observa que praticamente o dobro do teor de aditivo é necessário para manter a trabalhabilidade de traços com 30% de redução no consumo de cimento, em relação às misturas com 10% de redução. As misturas M – 108C – B apresentaram maior porcentagem de aditivo em relação aos traços M – 36C – B e M – 72C – B, chegando a 2% de superplastificante em relação à massa de cimento.

Os dados mostram, portanto, que a CBC requer uma maior demanda de água e aditivo superplastificante para proporcionar a trabalhabilidade constante, nas quais esse comportamento pode estar associado à forma irregular e de natureza altamente porosa das partículas de CBC.

### **9.2.3 Resistência Mecânica à Compressão**

Uma vez realizados os ensaios de consistência, foram produzidos corpos de prova de Microconcreto de dimensões 5 x 10 cm para análise da Resistência Mecânica à Compressão, aos 28, 90, 180 e 365 dias de cura.

Conforme explanado no item 9.1, os valores de fator  $k$  de eficácia cimentante serão obtidos por meio da obtenção do consumo de pozolana “ $p$ ”, sendo que este parâmetro é determinado pela intersecção da reta que fornece o valor de resistência mecânica à compressão dos traços controle com a curva que representa os valores de resistência das misturas com incrementos de pozolana.

Tanto para os procedimentos de mistura, adensamento, moldagem e cura dos corpos de prova de Microconcreto quanto para os ensaios de ruptura, se levou em conta os métodos definidos nos itens 4.2.7.1 a 4.2.7.4 da parte experimental.

A partir da redução do consumo de cimento e o correspondente aumento no consumo de CBC para diferentes classes de resistências, seguem nas Tabelas 9.8 a 9.10 abaixo os resultados de resistência mecânica à compressão (média e desvio padrão) dos corpos de prova ao longo do tempo de cura.

Tabela 9.8 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,3$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 54C – B).

Mistura	a/cm	Consumo CBC (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)			
			28	90	180	365
Resistência à Compressão (MPa)						
M-C-0,3	0,3000	0,0	74,2 ± 3,5	97,1 ± 5,3	111,9 ± 0,1	113,3 ± 3,6
M-54C-0 B	0,3340	0,0	73,3 ± 0,9	104,4 ± 1,4	103,1 ± 8,4	108,3 ± 3,0
M-54C-13,5 B	0,3246	13,5	69,5 ± 0,1	93,2 ± 5,1	105,9 ± 8,4	111,6 ± 5,6
M-54C-27 B	0,3160	27,0	73,9 ± 3,0	97,1 ± 4,8	112,0 ± 3,9	116,9 ± 2,8
M-54C-40,5 B	0,3080	40,5	79,8 ± 3,9	99,1 ± 4,0	114,4 ± 3,2	117,9 ± 6,7
M-54C-54 B	0,3000	54,0	83,1 ± 6,2	105,2 ± 4,8	115,6 ± 0,9	121,4 ± 8,7
M-54C-108 B	0,2727	108,0	88,7 ± 3,6	109,4 ± 2,4	119,6 ± 5,8	123,1 ± 1,5
M-54C-162 B	0,2500	162,0	96,7 ± 2,2	109,6 ± 0,3	120,0 ± 5,8	130,9 ± 1,5
M-54C-216 B	0,2307	216,0	98,9 ± 2,9	110,7 ± 4,2	120,3 ± 6,0	131,8 ± 3,1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9.9 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 36C – B).

Mistura	a/cm	Consumo CBC (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)			
			28	90	180	365
Resistência à Compressão (MPa)						
M-C-0,5	0,5000	0,0	44,7 ± 2,7	57,0 ± 2,1	60,8 ± 1,1	66,6 ± 0,7
M-36C-0 B	0,5560	0,0	37,8 ± 2,5	47,4 ± 5,1	48,7 ± 1,7	53,5 ± 4,8
M-36C-9 B	0,5403	9,0	37,1 ± 6,0	52,9 ± 1,7	51,0 ± 1,3	60,2 ± 0,2
M-36C-18 B	0,5268	18,0	38,1 ± 3,6	53,1 ± 2,1	55,1 ± 2,6	60,8 ± 0,9
M-36C-27 B	0,5130	27,0	39,6 ± 5,7	53,3 ± 2,0	57,2 ± 1,5	64,3 ± 0,9
M-36C-36 B	0,5000	36,0	39,3 ± 1,1	56,6 ± 5,7	62,1 ± 0,0	64,4 ± 0,6
M-36C-72 B	0,4548	72,0	46,1 ± 1,3	58,1 ± 0,8	65,0 ± 1,5	70,6 ± 1,0
M-36C-108 B	0,4165	108,0	47,0 ± 2,5	58,2 ± 1,5	67,3 ± 1,7	73,2 ± 0,8
M-36C-144 B	0,3850	144,0	52,8 ± 2,1	68,0 ± 1,3	74,1 ± 0,5	81,5 ± 1,8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9.10 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm=0,65$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M-29C-B).

Mistura	a/cm	Consumo CBC (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)			
			28	90	180	365
Resistência à Compressão (MPa)						
M-C-0,65	0,6500	0,0	29,1 ± 1,9	38,2 ± 0,9	41,1 ± 1,4	41,3 ± 1,5
M-29C-0 B	0,7230	0,0	25,2 ± 0,9	32,6 ± 0,6	31,8 ± 0,8	33,8 ± 0,9
M-29C-7,25 B	0,7036	7,25	23,8 ± 0,8	34,5 ± 0,6	36,4 ± 3,4	35,6 ± 1,7
M-29C-14,5 B	0,6850	14,5	24,6 ± 0,6	34,6 ± 4,2	39,0 ± 1,0	37,7 ± 2,2
M-29C-21,75 B	0,6670	21,75	25,0 ± 1,2	37,9 ± 1,5	40,4 ± 0,6	38,2 ± 0,7
M-29C-29 B	0,6500	29,0	29,0 ± 0,3	39,7 ± 1,2	41,9 ± 1,2	42,8 ± 1,2
M-29C-58 B	0,5902	58,0	30,2 ± 1,1	41,3 ± 1,5	42,7 ± 0,2	45,5 ± 1,5
M-29C-87 B	0,5410	87,0	35,4 ± 0,8	44,9 ± 1,0	46,9 ± 1,6	50,5 ± 0,4
M-29C-116 B	0,5000	116,0	36,4 ± 1,7	48,3 ± 1,8	52,7 ± 0,6	55,0 ± 0,9

Fonte: Elaboração do próprio autor.



Partindo-se da comparação entre as misturas M – 54C – B, M – 36C – B e M – 29C – B com diferentes relações a/cm dos traços controle (0,3 – 0,5 e 0,65, respectivamente), observa-se que valores de resistência à compressão obtidos apresentam um comportamento habitual frente aos valores de a/cm e idade de cura. De fato, tomando como base os traços controle (M – C – 0,3, M – C – 0,5 e M – C – 0,65), todas as misturas com a/cm menor proporcionaram maiores valores de resistência à compressão, sendo estes valores reduzidos para as misturas com a/cm médio e ainda menores para misturas com a/cm alto, evidenciando mais uma vez a Lei de Abrams. Além disso, incrementos nos valores de resistência à compressão foram observados com o tempo de cura.

Comparando-se os grupos de misturas M – 54C – B, M – 36C – B e M – 29C – B, percebe-se que diferentes classes de resistências mecânicas foram obtidas, permitindo uma comparação mais refinada entre os traços com aumento no consumo de CBC. Para misturas M – 54C – B, foram observadas resistências mecânicas de 69 MPa a 132 MPa, enquanto que, para misturas M – 36C – B, constatou-se resistências de 37 MPa a 82 MPa. Para os traços M – 29C – B, foram obtidos valores de tensão de 23 MPa a 55 MPa.

Os dados mostram claramente que a porcentagem de cimento removido causa redução dos valores de resistência à compressão, ao passo que o consumo de CBC adicionado proporcionou um aumento gradual nos valores de resistência. Se percebe que, a partir das misturas com consumo de cimento reduzido, pequenos incrementos no consumo de CBC causam aumentos graduais nos valores de resistência, mostrando sua efetividade mesmo para baixos teores de substituição.

As resistências dos traços M – 54C – B se mostraram bastante elevadas, chegando a 132 MPa aos 365 dias de cura, de modo que, para consumos baixos de CBC, permitiu-se obter resistências mecânicas compatíveis com a resistência da mistura controle.

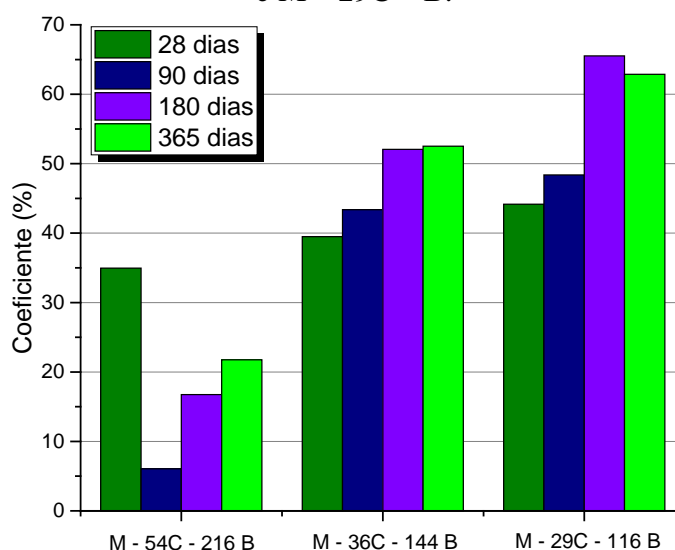
Uma observação interessante a ser feita está na comparação entre as misturas M – 36C – 9B e M – 29C – 116 B. Avaliando-se a proximidade entre os valores de resistência à compressão obtidos entre as dosagens, fica evidente que a CBC pode se comportar como uma adição mineral reativa. Mesmo sabendo que a mistura M – 29C – 116 B possui um consumo bem menor de cimento Portland ( $259,58 \text{ kg/m}^3$ ) em relação à mistura M – 36C – 9B ( $327,07 \text{ kg/m}^3$ ), é possível manter a similaridade de resistência mecânica entre as duas misturas fazendo uso de um consumo maior de CBC ( $116 \text{ kg/m}^3$ ) quando o consumo de cimento é mais baixo.

Em relação aos estudos dos teores de substituição de cimento Portland por CBC descritos na Parte 4, fica evidente que a relação a/cm exerce forte influência nos valores de resistência à compressão de microconcretos com CBC. De fato, na seção anterior, incrementos

no consumo de CBC, considerando relações  $a/cm$  constantes, causaram reduções nos valores de resistência mecânica. Um comportamento oposto foi observado nesta seção, visto que os incrementos no consumo de CBC estiveram aliados à redução nos valores das relações  $a/cm$ , o que proporcionou aumentos graduais nos valores de resistência mecânica.

Tomando-se como base os valores de resistência dos traços com consumo de cimento reduzido (M – 54C – 0 B, M – 36C – 0 B e M – 29C – 0 B), pode-se obter o valor máximo de resistência de cada um dos traços quando se adiciona o máximo teor de CBC, que corresponde a 4 vezes o consumo inicial de cimento reduzido. Para isso, tomando-se cada traço e idade de cura, verificam-se as porcentagens de aumento dos valores de resistência, de acordo com a Figura 9.6:

Figura 9.6 – Coeficiente entre resistências à compressão para misturas com mínimo consumo de cimento e máximo consumo de CBC, para o grupo de misturas M – 54C – B, M – 36C – B e M – 29C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

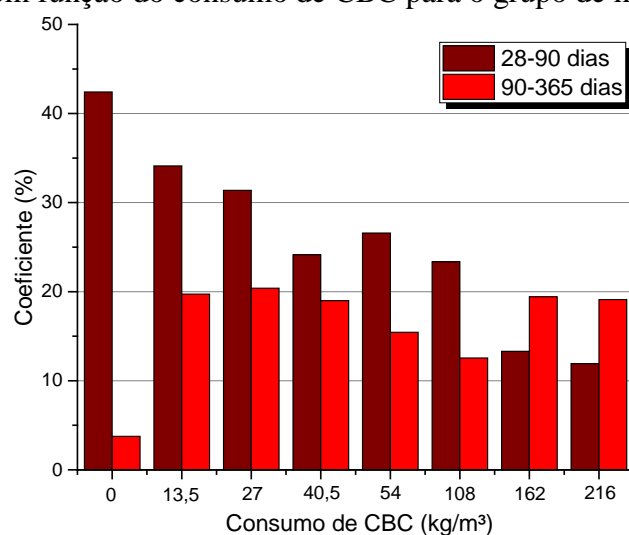
De fato, os dados mostram que o ganho mais expressivo para altos teores de CBC está para as misturas M – 36C – B e M – 29C – B. Para estas dosagens, fica evidente que a CBC novamente pode mostrar sua potencialidade de reação a longas idades, particularmente aos 180 e 365 dias de cura.

Em função do alto consumo de cimento, a variação entre a relação  $a/cm$  para o traço com cimento reduzido (M – 54C – 0 B) e o traço com máximo consumo de CBC (M – 54C – 216 B) foi menor, de  $a/cm = 0,3340$  para  $a/cm = 0,2307$ , se comparado com as misturas M – 36C e M – 29C. Isso pode influenciar no ganho menos expressivo dos valores de resistência mecânica, mas que, por outro lado, permitiram alcançar resistências mecânicas de até 35% superiores em relação ao traço com cimento reduzido.

Para altos consumos de CBC em traços com relação a/cm baixa, verifica-se um ganho de resistência mais efetivo aos 28 dias de cura, conforme ilustrado na Figura 9.6. Neste caso, assim como observado na Parte 4 dos resultados e discussões, o efeito de nucleação heterogênea parece estar bem pronunciado quando o teor de CBC é mais alto, associado ao alto consumo de cimento de pega rápida (alto efeito de alcalinidade), e que levou à obtenção de maiores coeficientes de eficácia. Além disso, verificou-se que, para traços com relação a/cm médias e altas, a eficácia da CBC em altas concentrações é menor porque o efeito de diluição nas primeiras idades pode ser mais expressivo, o que também pode ser análogo aos menores valores de ganho de resistência para as idades iniciais nos traços médios e altos obtidos nesta Parte do trabalho.

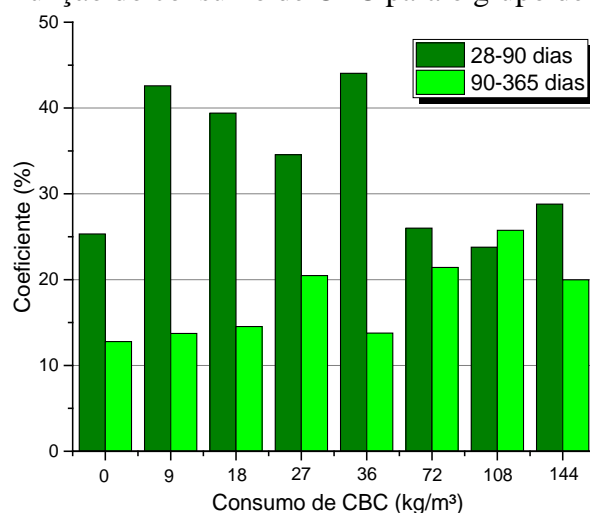
De maneira geral, um significativo aumento das resistências mecânicas foi observado aos 90 dias de cura, em relação aos 28 dias. Sendo assim, também serão avaliadas as porcentagens de ganho de resistência em função do tempo e do teor de CBC adicionado em cada grupo de misturas, de acordo com as Figuras 9.7 a 9.9.

Figura 9.7 - Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de mistura M – 54C – B.



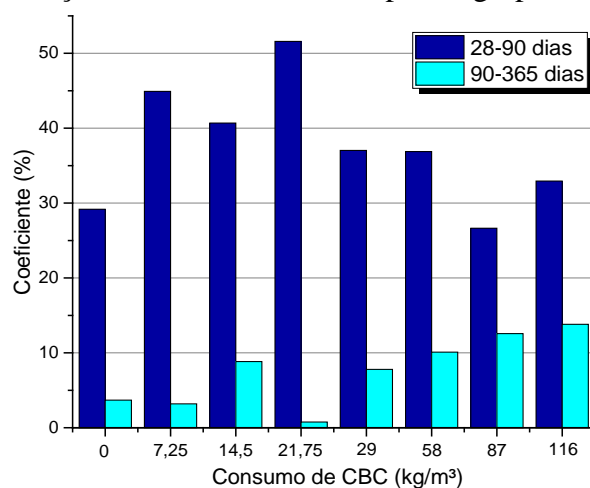
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9.8 - Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de mistura M – 36C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9.9 - Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de mistura M – 29C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados acima permitem observar que a contribuição das reações pozolânicas da CBC se manifestam a longas idades, visto que melhorias significativas na resistência mecânica à compressão de microconcretos com CBC foram constatadas aos 90 dias de cura. É notável que, em relação aos traços controle (0 kg/m³ de CBC), a CBC sempre proporciona maiores ganhos de resistência a longas idades.

Para  $a/cm = 0,3$  os dados mostram que os traços sem adição de CBC apresentam ganho de resistência expressivo até os 90 dias, sendo esta parcela bem menor dos 90 aos 365 dias. Entretanto, a adição de CBC leva a um ganho mais efetivo de resistência a longas idades, de tal forma que os traços com CBC continuam ganhando uma boa parcela de resistência até os 365 dias.

Os dados mostram que a máxima reatividade da CBC pode ser influenciada pelo seu consumo, visto que consumos baixos e médios de CBC tem proporcionado reatividade expressiva aos 90 dias de cura, ao passo que altos consumos de CBC tem sua reatividade justificada aos 365 dias de cura.

Entretanto, o grupo de misturas M – 29C – B mostrou a reatividade mais efetiva da CBC aos 90 dias de cura, visto que uma parcela mínima na porcentagem do ganho de resistência é vista dos 90 para os 365 dias de cura. Ainda assim, o incremento no consumo de CBC leva a reatividade mais tardia da pozolana.

A partir da comparação entre grupos de misturas com diferentes relações a/cm, serão apresentadas as Tabelas 9.11 e 9.12, que mostram as resistências mecânicas de microconcretos com relação a/cm constante e igual a 0,5 para os traços controle, considerando-se diferentes teores de cimento reduzido (20% e 30%) e CBC incrementada.

Tabela 9.11 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com a/cm = 0,5, demais traços com 20% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 72C – B).

Mistura	a/cm	Consumo CBC (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)		
			28	90	180
Resistência à Compressão (MPa)					
M–C–0,5	0,5000	0,0	44,7 ± 2,7	57,0 ± 2,1	60,8 ± 1,1
M–72C–0 B	0,6250	0,0	32,4 ± 5,0	39,1 ± 3,4	41,4 ± 1,2
M–72C–18 B	0,5880	18,0	31,2 ± 6,2	42,6 ± 2,4	48,4 ± 2,4
M–72C–36 B	0,5560	36,0	35,4 ± 0,5	52,8 ± 1,7	52,3 ± 0,9
M–72C–54 B	0,5267	54,0	49,8 ± 2,2	61,4 ± 0,7	61,8 ± 0,7
M–72C–72 B	0,5000	72,0	52,6 ± 1,0	62,4 ± 2,4	61,4 ± 0,7
M–72C–144 B	0,4165	144,0	64,2 ± 1,4	71,9 ± 1,6	73,1 ± 1,0
M–72C–216 B	0,3570	216,0	66,6 ± 0,5	76,8 ± 1,9	77,2 ± 1,2
M–72C–288 B	0,3125	288,0	77,4 ± 1,2	88,5 ± 1,9	92,6 ± 2,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9.12 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 30% de redução no Consumo de Cimento e adição de CBC (M – 108C – B).

Mistura	a/cm	Consumo CBC (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)		
			28	90	180
Resistência à Compressão (MPa)					
M-C-0,5	0,5000	0,0	44,7 ± 2,7	57,0 ± 2,1	60,8 ± 1,1
M-108C-0 B	0,7140	0,0	22,3 ± 1,5	36,3 ± 1,3	34,1 ± 1,7
M-108C-27 B	0,6450	27,0	33,7 ± 1,8	41,2 ± 0,6	41,9 ± 1,7
M-108C-54 B	0,5880	54,0	38,1 ± 1,0	43,7 ± 0,8	46,9 ± 1,9
M-108C-81 B	0,5405	81,0	43,9 ± 1,4	50,6 ± 2,6	53,2 ± 2,0
M-108C-108 B	0,5000	108,0	47,3 ± 1,2	58,2 ± 0,4	57,4 ± 1,1
M-108C-216 B	0,3845	216,0	60,3 ± 1,8	68,3 ± 1,1	70,6 ± 0,8
M-108C-324 B	0,3128	324,0	73,5 ± 2,8	84,3 ± 1,5	89,0 ± 0,9
M-108C-432 B	0,2632	432,0	78,7 ± 1,6	92,8 ± 3,7	100,3 ± 0,8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Da mesma forma, avaliando-se o grupo de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B, constata-se que valores de resistência à compressão obtidos apresentam um comportamento habitual frente aos valores de  $a/cm$  e idade de cura. De fato, o consumo de CBC adicionado também causou um aumento gradual nos valores de resistência à compressão, ultrapassando os valores de resistência da mistura controle.

Em relação às misturas controle (M – C – 0,5), observa-se que as misturas com cimento reduzido sempre apresentaram resistências mecânicas inferiores, sendo esta queda mais expressiva quando se retira maior consumo de cimento (108 kg/m<sup>3</sup>) e que conseqüentemente faz gerar uma relação  $a/cm$  maior (0,7140). Neste último caso, a resistência mecânica foi reduzida de 45 MPa para 22 MPa aos 28 dias de cura.

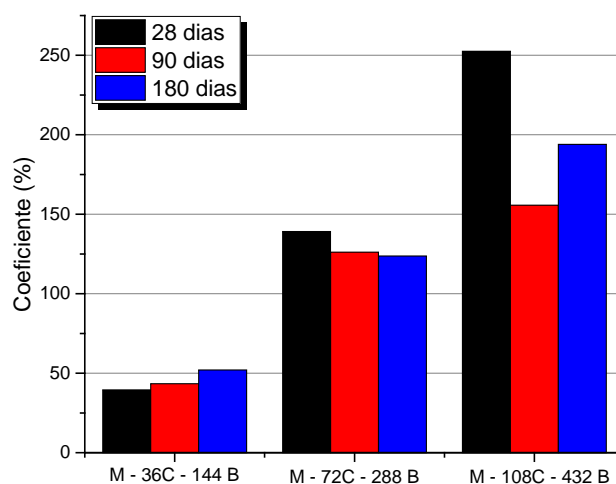
Comparando-se os grupos de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B, verifica-se que o ganho de resistência está diretamente relacionado com o teor de CBC incrementada, e esta propriedade não é evidente em apenas um grupo de misturas. De fato, baixos consumos de CBC (9 a 18 kg/m<sup>3</sup>) proporcionaram as maiores resistências entre os três grupos, para as misturas com 10% de cimento reduzido (M – 36C – B). Entretanto, médios consumos de CBC (54 a 144 kg/m<sup>3</sup>) evidenciaram melhores propriedades mecânicas para as misturas com 20% de cimento reduzido (M – 72C – B), ao passo que altos consumos de CBC (324 a 432 kg/m<sup>3</sup>) proporcionaram maiores resistências para as misturas com 30% de cimento reduzido (M – 108C – B).

As resistências das misturas M – 108C – B se mostram bastante elevadas, chegando a 100 MPa aos 180 dias de cura, em particular para as dosagens com elevado consumo de CBC, associado a relações a/cm muito baixas.

Isso mostra mais uma vez que, além do consumo de CBC, a idade de cura, relação a/cm e o teor de cimento Portland reduzido têm forte influência na obtenção das propriedades mecânicas de microconcretos com CBC.

Tomando-se como base os valores de resistência dos traços com consumo de Cimento reduzido (M – 36C – 0 B, M – 72C – 0 B e M – 108C – 0 B), pode-se obter o valor máximo de resistência de cada um destes traços quando se adiciona o máximo teor de CBC, que corresponde a 4 vezes o consumo inicial de cimento reduzido. Para isso, tomando-se cada traço e idade de cura, verificam-se as porcentagens de aumento dos valores de resistência, de acordo com a Figura 9.10:

Tabela 9.10 – Coeficiente entre resistências à compressão para misturas com mínimo consumo de cimento e máximo consumo de CBC, para o grupo de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados mostram o ganho mais expressivo de resistência mecânica para os traços com maior redução no consumo de cimento, o que gera maiores consumos de CBC adicionada.

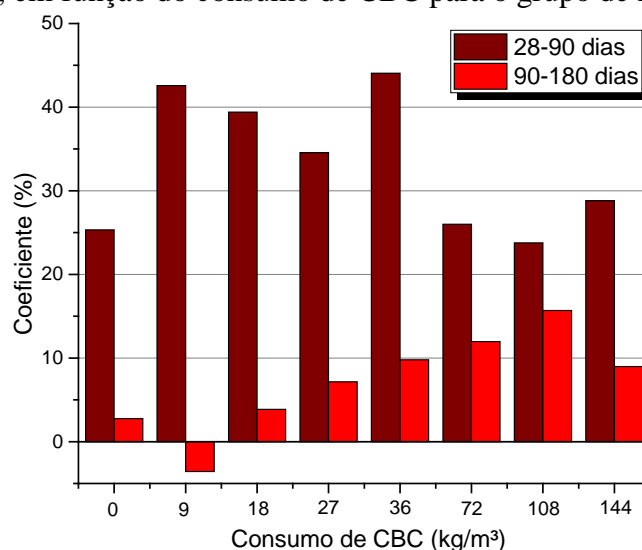
Em função do menor consumo de cimento reduzido, a variação entre a relação a/cm para esta mistura (M – 36C – 0 B) e o traço com máximo consumo de CBC (M – 36C – 144 B) foi menor, de a/cm = 0,5560 para a/cm = 0,3850, se comparado com as misturas M – 72C e M – 108C, que tiveram alterações da relação a/cm = 0,645 até a/cm = 0,2632. Isso pode influenciar no ganho menos expressivo dos valores de resistência mecânica, mas que, por outro lado, permitiram alcançar resistências mecânicas de até 52% superiores em relação ao traço com cimento reduzido.

Altas variações na relação a/cm e altos consumo de CBC para os grupos de misturas M – 72C e M – 108C proporcionaram elevadas porcentagens de ganho de resistência em todas as idades de cura, superando 120% e chegando a 250% para a mistura M – 108C – 432 B.

Para as misturas M – 36C – B, fica evidente que a CBC novamente pode mostrar sua potencialidade de reação a longas idades, em particular aos 180 dias. Além disso, para altos consumos de CBC e em traços com relação a/cm baixa, verifica-se que um ganho de resistência mais efetivo a curtas idades, o que pode ir de encontro aos efeitos físicos mais pronunciados quando o teor de CBC é mais alto.

De maneira geral, um significativo aumento das resistências mecânicas foi observado aos 90 dias de cura, em relação aos 28 dias. Sendo assim, também serão avaliadas as porcentagens de ganho de resistência em função do tempo e do teor de CBC adicionado em cada grupo de misturas, de acordo com as Figuras 9.11 a 9.13.

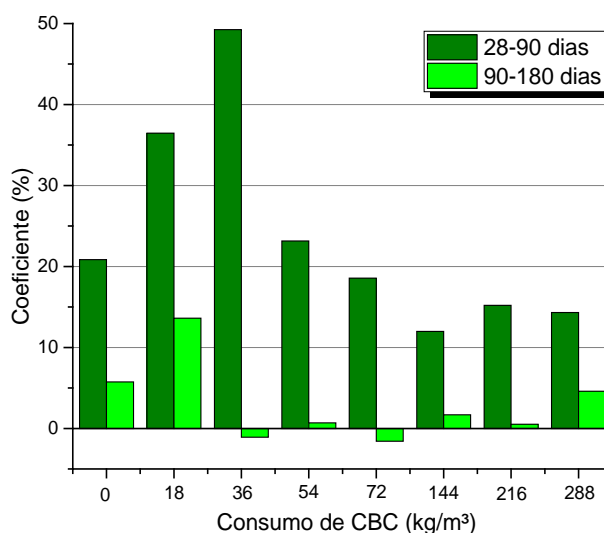
Figura 9.11 - Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-180 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de misturas M – 36C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

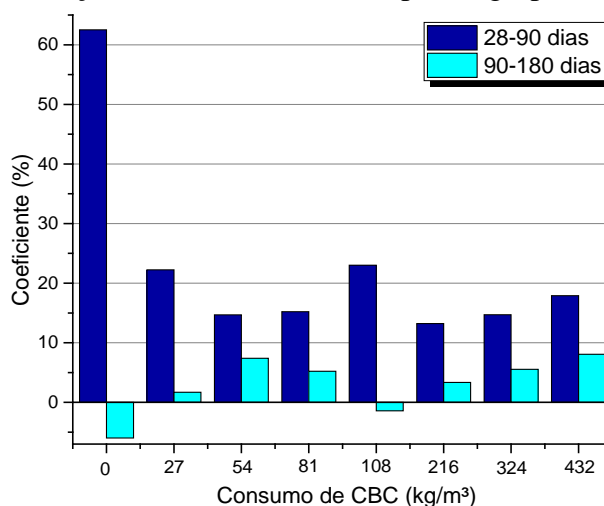


Figura 9.12 - Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-180 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de misturas M – 72C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9.13 - Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-180 dias de cura, em função do consumo de CBC para o grupo de misturas M – 108C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em relação ao traço controle, percebe-se que a CBC tem forte influência no ganho de resistência dos 28 para os 90 dias, mostrando mais uma vez sua possível efetividade pozolânica a longas idades. Para o grupo de misturas com 30% de redução no consumo de cimento (M – 108C – B), verifica-se que a mistura com 0% de CBC não demonstra reatividade efetiva dos 90 para os 180 dias de cura, sendo esta contribuição mais visível à medida em que se incrementa o consumo de CBC.

Da mesma forma que observado na Parte 4, altos consumos de CBC tem gerado uma redução no ganho de resistência dos 28 para os 90 dias de cura, entretanto esta influência

aumenta para idades de 180 dias de cura, mostrando que a efetividade da CBC é mais tardia à medida em que se incrementa seu consumo.

Os dados mais efetivos de ganho foram obtidos para as misturas com 10% de redução de cimento Portland, indicando que menores teores de CBC podem garantir melhorias nas propriedades mecânicas de microconcretos.

Da mesma forma que observado nos valores dos coeficientes  $k$  eficácia cimentante na Parte 4, os dados de eficácia e ganhos de resistência aos 180 dias de cura parecem ser poucos expressivos em relação aos dados de 90 dias de cura, corroborando os efeitos da CBC mesmo quando são aplicadas metodologias diferentes, e que envolvam a análise dos consumos de materiais, relação a/cm, teor de pozolana e tempo de cura.

A partir da comparação mencionada acima, se dará atenção aos valores de resistência obtidos por meio das metodologias especificadas nesta Parte e na Parte 4 do trabalho, que leva em consideração a Resistência Mecânica de Microconcretos com CBC em termos da relação a/cm ( $R_{c(a/cm)}$ ) (1), e a metodologia aqui discutida, que leva em consideração a Resistência Mecânica em termos do consumo de Pozolana ( $R_{c(p)}$ ) (2). Se pretende, portanto, avaliar a similaridade de resistências mecânicas à compressão para os traços entre os dois métodos, de forma a aproximar os índices que referentes à relação a/cm, relação ag/cm e porcentagem de CBC nas misturas. Também se dará destaque para a comparação entre os traços controle definidos em ambas as Partes, sendo os dados mostrados na Tabela 9.13 abaixo:

Tabela 9.13 – Comparação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Relação a/cm (1) e Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de Material Pozolânico (2).

Mistura	Agreg. /cm	a/cm	% CBC	Tempo de Cura (dias)			
				28	90	180	365
				Resistência à Compressão (MPa)			
M-C-0,3 (1)	3,500	0,300	0,000	66,0	94,5	101,5	109,8
M-C-0,3 (2)	3,500	0,300	0,000	74,2	97,1	111,9	113,3
M-C-0,5 (1)	5,500	0,500	0,000	41,8	57,0	62,5	62,9
M-C-0,5 (2)	5,500	0,500	0,000	44,7	57,0	60,8	66,6
M-C-0,65 (1)	7,000	0,650	0,000	28,4	37,5	38,6	39,4
M-C-0,65 (2)	7,000	0,650	0,000	29,1	38,2	41,1	41,3
M-54C-40,5 B	3,606	0,308	7,722	79,8	99,1	114,4	117,9
M - B15 - 0,30	3,500	0,300	15,000	60,6	101,0	100,1	112,9
M - C - 0,30	3,500	0,300	0,000	66,0	94,5	101,5	109,8
M-36C-9 B	6,015	0,540	2,710	37,1	52,9	51,0	60,2
M - B15 - 0,55	6,000	0,550	15,000	35,1	46,0	48,5	52,7
M - C - 0,55	6,000	0,550	0,000	40,0	49,6	53,7	55,1
M-36C-27 B	5,661	0,513	7,695	39,6	53,3	57,2	64,3
M - B15 - 0,50	5,500	0,500	15,000	38,4	52,5	55,2	61,1
M - C - 0,50	5,500	0,500	0,000	41,8	57,0	62,5	62,9
M-36C-72 B	4,910	0,455	18,190	46,1	58,1	65,0	70,6
M - B15 - 0,45	5,000	0,450	15,000	43,8	59,4	63,8	72,5
M - C - 0,45	5,000	0,450	0,000	43,1	61,4	69,9	68,0
M-36C-144 B	4,013	0,385	30,77	52,8	68,0	74,1	81,5
M - B30 - 0,35	4,000	0,350	30,000	52,7	80,0	87,9	89,6
M - C - 0,35	4,000	0,350	0,000	61,5	83,8	98,3	99,9
M-29C-29 B	6,996	0,650	10,050	28,95	39,7	41,9	42,8
M - B15 - 0,65	7,000	0,650	15,000	29,80	34,2	37,2	39,6
M - C - 0,65	7,000	0,650	0,000	28,37	37,5	38,6	39,4
M-29C-58 B	6,268	0,590	18,260	30,18	41,3	42,7	45,5
M - B15 - 0,60	6,500	0,600	15,000	29,68	40,2	40,9	47,7
M - C - 0,60	6,500	0,600	0,000	35,66	39,1	44,6	43,5

Tabela 9.13 (Continuação) – Comparação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Relação a/cm e Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de Material Pozolânico.

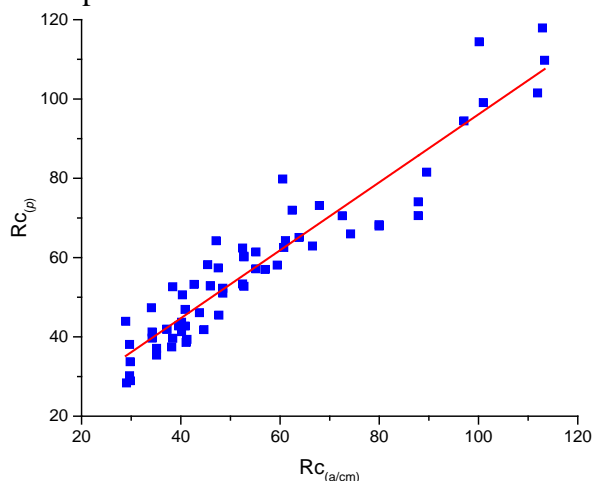
M-72C-36 B	6,201	0,556	11,105	35,41	52,8	52,3	-
M – B15 – 0,55	6,000	0,550	15,000	35,1	46,0	48,5	52,7
M – C – 0,55	6,000	0,550	0,000	40,0	49,6	53,7	55,1
M-72C-72 B	5,488	0,500	20,000	52,6	62,4	61,4	-
M – B15 – 0,50	5,500	0,500	15,000	38,4	52,5	55,2	61,1
M – C – 0,50	5,500	0,500	0,000	41,8	57,0	62,5	62,9
M-72C-144 B	4,417	0,416	33,320	64,2	71,9	73,1	-
M – B30 – 0,40	4,500	0,400	30,000	47,1	62,4	67,9	73,0
M – C – 0,40	4,500	0,400	0,000	51,0	69,3	72,7	76,4
M-108C-27 B	7,337	0,645	9,670	33,7	41,2	41,9	-
M – B15 – 0,65	7,000	0,650	15,000	29,8	34,2	37,2	39,61
M – C – 0,65	7,000	0,650	0,000	28,4	37,5	38,6	39,36
M-108C-54 B	6,609	0,588	17,650	38,1	43,7	46,9	-
M – B15 – 0,60	6,500	0,600	15,000	29,7	40,2	40,9	47,7
M – C – 0,60	6,500	0,600	0,000	35,7	39,1	44,6	43,5
M-108C-81 B	5,998	0,540	24,310	43,9	50,6	53,2	-
M – B30 – 0,55	6,000	0,550	30,000	28,9	40,3	42,7	45,9
M – C – 0,55	6,000	0,550	0,000	40,0	49,6	53,7	55,1
M-108C-108 B	5,476	0,500	30,000	47,3	58,2	57,4	-
M – B30 – 0,50	5,500	0,500	30,000	34,1	45,4	47,5	51,4
M – C – 0,50	5,500	0,500	0,000	41,8	57,0	62,5	62,9
M-108C-216 B	4,002	0,384	46,130	60,3	68,3	70,6	-
M – B30 – 0,35	4,000	0,350	30,000	52,7	80,0	87,9	89,6
M – C – 0,35	4,000	0,350	0,000	61,5	83,8	98,3	99,9

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em relação às misturas controle, fica evidente que os dados de resistência à compressão são próximos entre si, mostrando boa confiabilidade na reprodução das misturas. Portanto, verifica-se que a analogia dos traços que leve em consideração os parâmetros ag/cm, a/cm e porcentagem de CBC se mostrou efetiva, permitindo correlacionar as resistências obtidas pelas 2 metodologias em um único gráfico. De fato, a Figura 9.14 abaixo mostra uma aceitável relação entre os dados experimentais obtidos por ambos os métodos, representado por todas as idades de cura. O fator de determinação obtido foi de 0,89, sendo possível obter um ajuste linear dos dados, conforme Equação 9.7 abaixo:

$$Rc_{(p)} = 0,857 * Rc_{(a/cm)} + 10,417 \quad (9.7)$$

Figura 9.14 – Correlação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Relação a/cm ( $R_{c(a/cm)}$ ) e Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de Material Pozolânico ( $R_{c(p)}$ ).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 9.14 também mostra que a diferença entre as resistências mecânicas dos dois modelos é mais discrepante para as misturas com relação a/cm baixa. De fato, deve-se considerar que se trata de composições de concreto, nas quais a existência de três fases de sua microestrutura (matriz, zona de transição e agregados) pode aumentar a variabilidade dos dados de resistência mecânica.

Para as misturas com adição de CBC, o efeito comparativo entre as relações ag/cm, a/cm e porcentagem de pozolana se mostrou efetiva, visto que foram obtidas resistências similares entre os traços mencionados, para todas as idades de cura.

O efeito comparativo também pode servir de base para avaliar a reatividade da CBC ao longo do tempo. De fato, apesar de alguns traços com CBC apresentar resistência mecânica inferior ao controle aos 28 dias de idade, pode-se inferir que a longas idades as resistências mecânicas tendem a se igualar.

Avaliando-se o grupo composto pelas misturas M – 54C – 40,5 B e M – B15 – 0,30, além do grupo de misturas M – 36C – 9 B e M – B15 – 0,55, o modelo proposto neste capítulo evidencia que baixas porcentagens de CBC tem proporcionado melhores propriedades mecânicas. Este efeito é ainda mais perceptível a longas idades (180 e 365 dias), onde a diferença entre resistências de traços com altos e baixos tores de CBC parece ser mais discrepante, superando os valores das resistências dos traços controle.

Ao analisar as misturas M – 108C – 216 B e M – B30 – 0,35, fica claro que altas porcentagens de CBC parece influenciar no efeito físico a curtas idades, mas que porcentagens menores de CBC parece influenciar o efeito pozolânico a longas idades (acima de 90 dias).

### 9.3 DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MICROCONCRETOS COM ADIÇÃO DE MATERIAL INERTE

A fim de comparar o potencial pozolânico da CBC com o efeito de partícula (efeito fíler) de um material que apresente estabilidade físicoquímica (inerte), se decidiu substituir a CBC por Quartzo Triturado, que apresenta caráter inerte do ponto de vista pozolânico. Este material foi obtido por meio do processo de moagem e peneiramento, descrito no item 4.2.2, de forma a obter características físicas próximas à da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar.

#### 9.3.1 Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Microconcretos

Com base na estrutura definida no item 9.2, se propôs avaliar a inclusão do Quartzo Triturado tomando como base as misturas controle com  $a/cm = 0,5$ , para então se reduzir 10% do Consumo de Cimento Portland e permitir incrementar consumos de material inerte. A dosagem da mistura referente encontra-se na Tabela 9.14 abaixo:

Tabela 9.14 – Dosagens de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm = 0,5$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de Inerte (M – 36C – I).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% Inerte	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
					Cimento	Areia	B O	Pó P.	Água	Inerte
M-C-0,5	5,500	0,5300	0,5000	0,000	360,20	880,68	660,24	440,16	180,10	0,00
M-36C-0 I	6,210	0,5291	0,5560	0,000	324,01	912,03	660,05	440,03	180,15	0,00
M-36C-9 I	6,015	0,5293	0,5403	2,710	324,14	903,90	660,06	440,04	180,01	9,03
M-36C-18 I	5,833	0,5293	0,5268	5,270	324,04	895,09	660,11	440,07	180,20	18,03
M-36C-27 I	5,661	0,5295	0,5130	7,695	324,03	887,09	660,10	440,07	180,09	27,01
M-36C-36 I	5,498	0,5297	0,5000	10,000	324,00	879,08	660,07	440,05	180,00	36,00
M-36C-72 I	4,910	0,5301	0,4548	18,190	324,11	845,00	660,13	440,09	180,18	72,06
M-36C-108 I	4,425	0,5307	0,4165	25,000	324,13	812,08	660,18	440,12	180,00	108,04
M-36C-144 I	4,013	0,5312	0,3850	30,770	324,07	778,41	660,05	440,03	180,22	144,03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 9.3.2 Trabalhabilidade

Durante o processo de moldagem dos corpos de prova de Microconcretos, também foi analisada a trabalhabilidade das misturas, de forma a se conhecer o efeito do aditivo superplastificante e do quartzo triturado sobre a consistência dos microconcretos. Mantendo-se o consumo de água constante, avaliou-se a porcentagem de substituição de Aditivo Superplastificante em relação à massa de inerte com a massa de cimento Portland, para garantir o Mini-Slump de  $40 \pm 10$  mm uma abertura de consistência de  $290 \pm 10$  mm.

Os resultados referentes à porcentagem de Aditivo Superplastificante, Mini-Slump e Mesa de Consistência (Abertura), para as misturas definidas nesta seção, são mostrados na Tabela 9.15.

Tabela 9.15 – Trabalhabilidade de Microconcretos com Adição de Material Inerte.  
Traço Controle com a/cm = 0,5, demais traços com 10% de redução no consumo de Cimento e adição de Inerte (M – 36C – I)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Mini-Slump (mm)	Abertura (mm)
M-C-0,5	0,5000	0,32	37,0	290,0
M-36C-0 I	0,5560	0,31	40,0	280,0
M-36C-9 I	0,5403	0,37	38,0	287,0
M-36C-18 I	0,5268	0,33	45,0	296,0
M-36C-27 I	0,5130	0,34	39,0	282,0
M-36C-36 I	0,5000	0,37	43,0	289,0
M-36C-72 I	0,4548	0,27	40,0	283,0
M-36C-108 I	0,4165	0,30	40,0	281,0
M-36C-144 I	0,3850	0,20	50,0	279,0

Fonte: Elaboração do próprio autor

Inicialmente, constata-se que, para todas as dosagens adição de inerte, a relação a/cm tem influência na porcentagem de substituição de aditivo. Em relação aos traços controle, pode-se constatar que as misturas com baixos consumos de inerte apresentaram teores ligeiramente superiores de aditivo. Ao contrário dos traços com CBC, baixas porcentagens de superplastificante foram observadas para altos consumos de inerte.

As porcentagens de superplastificante definidas proporcionaram ótima correlação entre os parâmetros definidos para a Mesa de Consistência e Mini-Slump, estando entre os limites estabelecidos de  $40 \pm 10$  cm e  $290 \pm 10$  mm, respectivamente.

A partir dos dados obtidos, se decidiu correlacionar a porcentagem de aditivo superplastificante com o consumo de Inerte ( $i$ ) adicionado nas misturas, por meio da análise de regressão das curvas experimentais. Sendo assim, o modelo que melhor descreve os dados experimentais é o Polinomial de Ordem 3, sendo que os parâmetros de ajuste (A, B, C e D) das curvas teóricas estão listados na Tabela 9.16, de acordo com a equação 9.8:

$$\% \text{ Superp.} = (A * i^3) + (B * i^2) + (C * i) + D \quad (9.8)$$

Tabela 9.16 – Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Microconcretos em função da porcentagem de Superplastificante e consumo de Material Inerte.

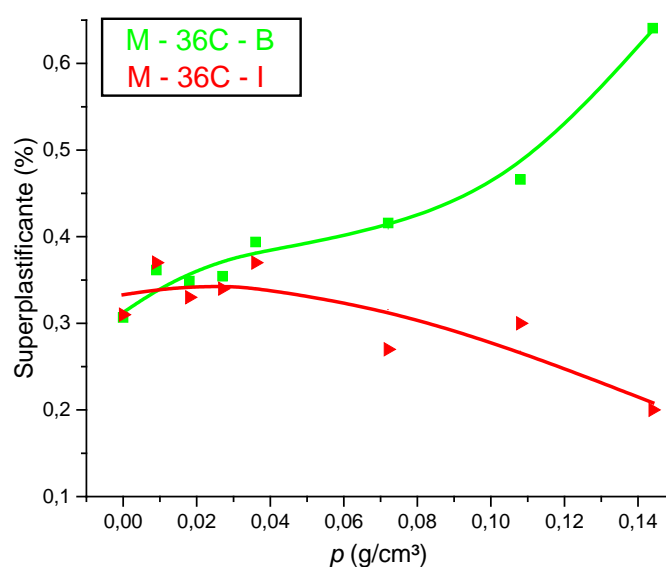
Mistura	A	B	C	D	R <sup>2</sup>
M-36C-I	40,136	-17,412	0,809	0,333	0,745

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao contrário das misturas com CBC, o método de regressão das curvas experimentais proporcionou menor coeficiente de determinação. Isso demonstra, que, mesmo aplicando um modelo polinomial de grau superior, o material inerte não proporciona um comportamento habitual da porcentagem de aditivo frente à relação a/cm.

Atribuindo-se uma relação a/cm média (0,5) constante para os traços controle, pode-se verificar, de acordo com a Figura 9.15, a evolução da porcentagem de aditivo superplastificante em relação ao consumo de inerte para 10% de redução no consumo de Cimento Portland. Também foi incluída a evolução da porcentagem de aditivo superplastificante em relação ao consumo de CBC, para a mistura M – 36C – B.

Figura 9.15 – Porcentagem de aditivo Superplastificante em função do consumo de Material Inerte para manter a mesma trabalhabilidade de Microconcretos dos grupos de mistura M – 36C – B e M – 36C – I.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para as misturas com adição de material inerte, não foram observados incrementos de aditivo para manter a trabalhabilidade constante. Os maiores consumos de quartzo triturado requereram porcentagens menores de aditivo. Isso mostra maior compacidade do material, que remete a baixa porosidade do quartzo cristalino em relação à CBC, e sua característica não pozolânica, visto a proximidade de granulometria entre o inerte e a adição.



### 9.3.3 Resistência Mecânica à Compressão

Uma vez realizados os ensaios de consistência descritos no item anterior, foram produzidos corpos-de-prova de Microconcreto de dimensões 5 x 10 cm para análise da Resistência Mecânica à Compressão, aos 28, 90, 180 e 365 dias de cura.

A partir da redução do consumo de cimento e o correspondente aumento no consumo de inerte, segue na Tabela 9.17 abaixo os resultados de resistência Mecânica à Compressão (média e desvio padrão) dos corpos de prova ao longo do tempo de cura.

Tabela 9.17 – Resistência à Compressão de Microconcretos para Traço Controle com  $a/cm=0,5$ , demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de Inerte (M – 36C – I).

Mistura	a/cm	Consumo Inerte (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)			
			28	90	180	365
Resistência à Compressão (MPa)						
M-C-0,5	0,5000	0,0	44,7 ± 3,8	57,0 ± 2,1	60,8 ± 1,1	66,6 ± 0,7
M-36C-0 I	0,5560	0,0	37,8 ± 2,5	47,4 ± 5,1	48,7 ± 1,7	49,9 ± 4,8
M-36C-9 I	0,5403	9,0	38,0 ± 1,7	48,4 ± 4,8	52,0 ± 3,7	54,2 ± 5,9
M-36C-18 I	0,5268	18,0	36,6 ± 4,5	44,0 ± 1,7	52,0 ± 2,6	52,9 ± 4,0
M-36C-27 I	0,5130	27,0	36,8 ± 5,5	40,8 ± 4,9	44,2 ± 1,7	43,6 ± 1,4
M-36C-36 I	0,5000	36,0	36,5 ± 2,5	38,8 ± 3,3	43,9 ± 4,7	43,0 ± 5,4
M-36C-72 I	0,4548	72,0	33,7 ± 1,6	39,6 ± 2,8	41,9 ± 1,0	44,9 ± 2,9
M-36C-108 I	0,4165	108,0	30,2 ± 5,3	38,9 ± 5,6	41,7 ± 6,5	49,5 ± 4,0
M-36C-144 I	0,3850	144,0	35,4 ± 1,1	43,5 ± 2,5	49,1 ± 2,0	50,0 ± 4,4

Fonte: Elaboração do próprio autor.

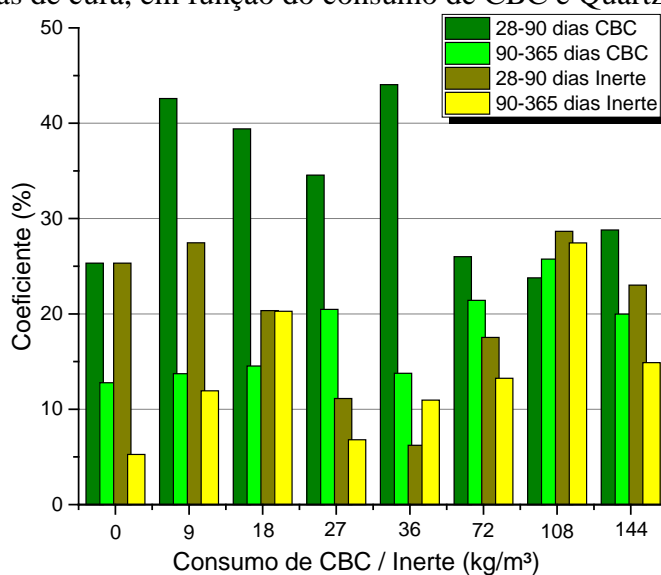
Os dados mostram que, em relação aos traços controle M – C – 0,5, todas as misturas com adição de quartzo triturado mostram queda nos valores de resistência à compressão. Reduções de até 35,4% da resistência foram observadas para a mistura M – 36C – 36 I aos 365 dias de cura, mostrando que a inserção de material inerte em misturas de microconcretos pode alterar significativamente sua capacidade mecânica.

Comportamentos similares foram obtidos por Lollini, Redaelli e Bertolini (2014), indicando que o fíler calcário pode se comportar como material inerte. De fato, reduções de até 30% foram constatadas quando 30% de cimento são substituídos pela adição mineral, ao passo que reduções de 12,6% e 19,5% foram obtidas quando se utiliza cinza volante e pozolana natural, respectivamente.

De maneira geral, o traço que apresentou maior queda é o M – 36C – 108 I, que apresenta 25 % de material inerte em relação à massa de Cimento Portland.

De maneira análoga aos traços com adição de CBC, se pretende avaliar o comportamento de cada porcentagem de material inerte adicionado, comparando-se com as misturas controle em relação ao tempo de cura. Para isso, a Figura 9.16 abaixo mostra as porcentagens de ganho de resistência em função do tempo e do teor de inerte adicionado. Para efeitos de comparação com a CBC, também são indicadas as porcentagens de ganho para os traços do grupo M – 36C – B.

Figura 9.16 - Valores em porcentagem do aumento de resistência mecânica dos 28-90 e dos 90-365 dias de cura, em função do consumo de CBC e Quartzo Triturado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em relação às amostras sem adição de inerte, o incremento no consumo de quartzo não proporcionou aumento nos coeficientes de ganho de resistência.

Além disso, os dados são evidentes quando se verifica que os traços com inerte apresentam ganhos de resistência menores de uma idade para outra, em comparação com as misturas constituídas de CBC. Esta discrepância é mais acentuada dos 28 para os 90 dias de idade, nas quais se observa que existe uma diferença de até 37,8% na porcentagem de ganho, exemplificada pelo traço M – 36C – 36 I, em relação ao traço M – 36C – 36 B. Isso mostra que o efeito pozolânico da CBC também influencia no ganho de resistência ao longo do tempo de cura. De fato, Cordeiro e Kurtis (2017) verificaram que apenas 1,2% da fração de sílica presente no material inerte é reativa, mostrando uma natureza não pozolânica.

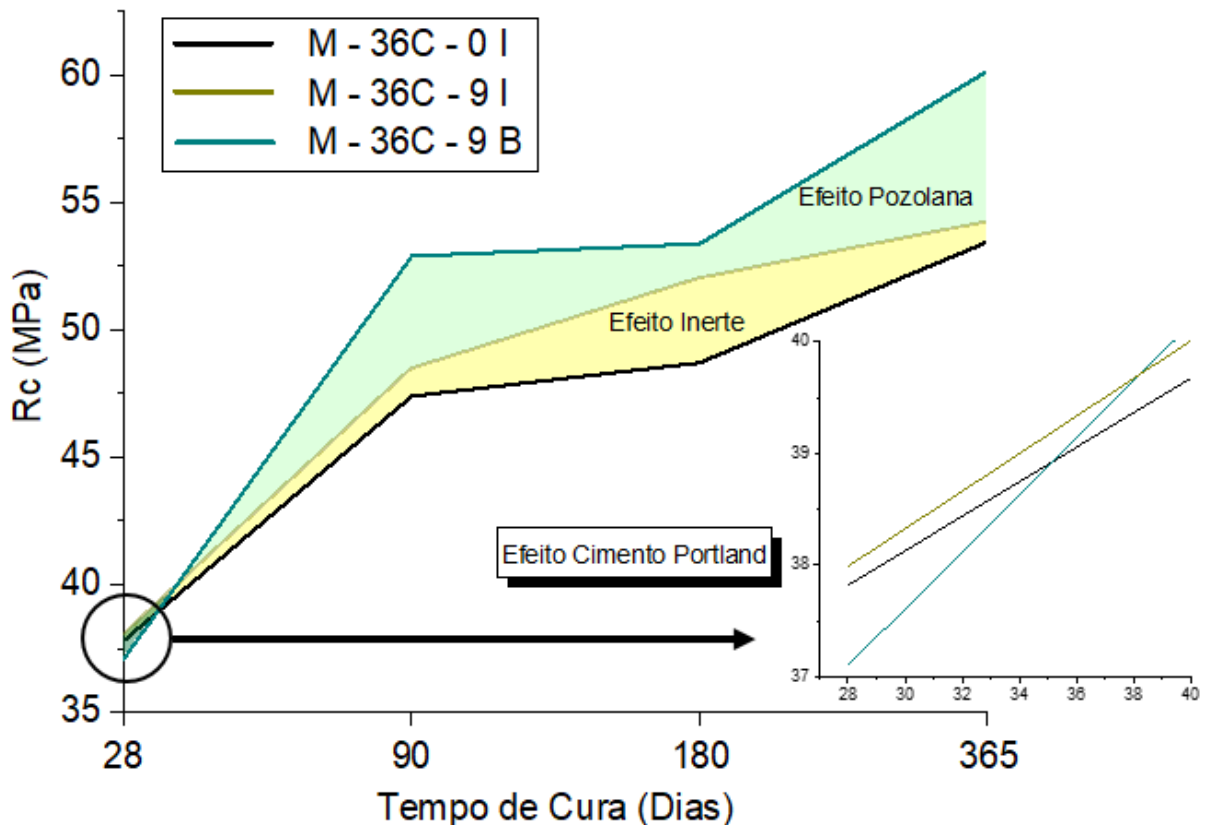
Em relação ao quartzo triturado, a CBC parece ter uma interferência maior nas porcentagens de ganho de resistência até um consumo de 72 kg/m³, o que indica uma porcentagem máxima de substituição de CBC por cimento Portland da ordem de 15%.

Tomando-se como base as misturas com consumo de cimento reduzido (M – 36C – 0 I), as misturas com inerte também tiveram os valores de resistências reduzido; entretanto, para incrementos de baixos teores de quartzo a partir desta mistura, se verificou um pequeno ganho das propriedades mecânicas.

A partir desta observação, se dará atenção à mistura com 9 kg/m<sup>3</sup> de inerte (M – 36C – 9 I), considerando que apenas este traço teve incrementos nos valores de resistência em relação à mistura M – 36C – 0 I. De fato, fica evidente que traços com mais de 27 kg/m<sup>3</sup> de inerte não apresentam efeito de partícula.

Quando o compósito cimentício contém uma pozolana, existe a combinação dos efeitos físicos e químicos, que são responsáveis por contribuir para as resistências mecânicas. Por meio da comparação entre as misturas do grupo M – 36C – 9 B (com CBC) e grupo M – 36C – 9 I (com inerte), se pretende, portanto, quantificar o efeito físico do quartzo triturado e o efeito pozolânico da CBC ao longo do tempo, por meio da Figura 9.17 abaixo.

Figura 9.17 – Representação dos efeitos físicos e químicos do quartzo triturado e CBC ao longo do tempo de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 9.17 mostra com clareza a distinta influência ao se adicionar um material inerte e uma pozolana. De fato, em relação às misturas controle, a CBC apresenta uma influência muito mais significativa no ganho de resistência mecânica com o tempo de cura, e também superior às misturas com adição de quartzo triturado. Mesmo assim, a adição de material inerte também proporciona aumento nos valores de resistência à compressão em relação às misturas controle, o que se pode perceber que os efeitos físicos desses materiais podem ter influência nos efeitos de refinamento na pasta de microconcretos, conduzindo a melhorias na zona de transição entre a pasta de cimento e agregados da mistura.

Martínez-Velandia (2006) mostra que a contribuição pozolânica da sílica ativa é muito baixa aos 7 dias de cura, visto que as resistências à compressão de argamassas contendo o material e fíler calcário estiveram próximas entre si.

Segundo Cyr, Lawrence e Ringot (2003) e Cordeiro e Kurtis (2017), os efeitos de nucleação heterogênea são mais evidentes em misturas com adição de quartzo, e que estes efeitos estão associados à alta superfície específica e porcentagem de substituição do material inerte.

Por meio da ampliação da Figura 9.17, verifica-se que o efeito físico supera o efeito pozolânico a tempos curtos, embora esta diferença seja de pequena amplitude. Para as adições minerais inertes e não inertes, percebe-se que os efeitos de preenchimento nestas idades são pouco pronunciados e não suficiente para proporcionar grandes incrementos de resistência mecânica. Os gráficos evidenciam que, a aproximadamente 40 dias de cura, o efeito pozolânico supera o efeito físico, mostrando um crescimento substancial e sempre maior que o efeito provocado pelo material inerte. Se verifica que, aos 90 dias, o efeito pozolânico é bastante expressivo, mostrando que a resistência à compressão de microconcretos é referente a 48,4 MPa e 52,9 MPa, utilizando quartzo triturado e CBC, respectivamente, em relação aos 47,4 MPa obtidos para o traço controle M – 36C – 0 I.

De maneira análoga às demais conclusões, a maior influência pozolânica da CBC sempre ocorre para idades mais tardias, sendo este efeito bem mais pronunciado aos 365 dias de cura. Em idades de cura mais avançadas, ainda é possível verificar o efeito microfíler ocasionado pela inclusão do material inerte, entretanto este comportamento parece ser reduzido a partir dos 90 dias de cura, com tendência de se anular aos 365 dias de idade.

## 9.4 CÁLCULO DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE PARA MICROCONCRETOS COM ADIÇÃO DE CBC

A partir do estudo das propriedades mecânicas avaliadas no item anterior, será aplicada a metodologia descrita no item 9.1 para obtenção do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante de microconcretos com CBC em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de CBC adicionada.

Inicialmente, serão plotadas as curvas de resistências à compressão de microconcretos em relação ao consumo de CBC adicionada, fornecidas por cada grupo de misturas (M – 54C – B, M – 36C – B, M – 29C – B, M – 72C – B e M – 108C – B).

### 9.4.1 Modelos de Ajuste das Curvas $R_c$ x $p$

A obtenção do consumo “ $p$ ” de CBC se dará de maneira experimental, e também utilizando o método de regressão das curvas experimentais para obtenção dos modelos teóricos. Sendo assim, o modelo que melhor expressa o comportamento das curvas experimentais é o Modelo Potencial, assim como já utilizado no capítulo anterior para obter os valores do fator  $k$  de eficácia cimentante em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Relação Água/Cimento. Sendo assim, os valores teóricos de Resistência Mecânica à compressão serão obtidos por meio do consumo de Pozolana  $p$ , seguindo a equação modelo 9.9:

$$R_c = R_o * (p)^h \quad (9.9)$$

Onde  $R_o$  e  $h$  são parâmetros de ajuste da equação.

A Tabela 9.18 abaixo mostra os parâmetros de ajuste do modelo proposto ao longo do tempo de cura, bem como o erro relativo médio e o coeficiente de Determinação, para os diferentes grupos de misturas com inclusões de CBC.

Tabela 9.18 – Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Consumo de Pozolana.

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$R_o$	$h$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
M – 54C - B		48,903	0,1311	1,080	0,989
M – 36C - B		26,751	0,1253	3,337	0,894
M – 29C - B	28	16,158	0,1660	4,269	0,916
M – 72C - B		12,226	0,3274	5,487	0,954
M – 108C - B		10,923	0,3223	3,629	0,983
M – 54C - B		78,693	0,0662	1,287	0,944
M – 36C - B		43,092	0,0754	3,453	0,728
M – 29C - B	90	26,060	0,1223	2,411	0,936
M – 72C - B		22,102	0,2406	2,975	0,976
M – 108C - B		13,627	0,3093	4,773	0,966
M – 54C - B		95,907	0,0449	1,049	0,931
M – 36C - B		38,444	0,1260	1,839	0,968
M – 29C - B	180	28,399	0,1163	2,533	0,900
M – 72C - B		24,600	0,2220	3,971	0,959
M – 108C - B		13,441	0,3208	5,102	0,968
M – 54C - B		95,524	0,0591	0,910	0,959
M – 36C - B		45,787	0,1049	2,805	0,900
M – 29C - B	365	24,945	0,1571	2,964	0,943
M – 72C - B		-	-	-	-
M – 108C - B		-	-	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 9.4.2 Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação

Em relação aos modelos utilizados na Parte 4 para cálculo de fator  $k$  em termos de resistência à compressão x relação a/c, os dados deste segundo método se mostram bastante aceitáveis frente aos valores de erro relativos médio e coeficiente de determinação obtidos. De fato, foram constatados valores de  $R^2$  acima de 0,894 e  $e_{rm}(\%)$  abaixo de 5%; apenas o grupo de misturas M – 36C – B gerou uma curva com coeficiente de determinação menor em relação às demais (0,728) aos 90 dias de cura, porém apresentou valor aceitável de erro relativo médio.

Também observou-se um comportamento contínuo dos parâmetros de ajuste ao longo do tempo, mostrando boa confiabilidade dos resultados experimentais de resistência à compressão.

Se observa que o modelo Potencial proposto, no geral, proporcionou uma correlação melhor para o grupo de misturas M – 54C – B; valores de erro relativos médio muito baixos foram observados, da ordem de 1%. De fato, misturas com maior consumo de cimento e CBC evidenciaram menor variabilidade nos dados de resistência à compressão, se relacionados com misturas com consumos médios e baixos de aglomerante e mais altos valores das relações a/cm (M – 36C – B e M – 29C – B).

#### 9.4.3 Curvas Teóricas “Rc x Consumo de CBC” ajustadas aos dados experimentais

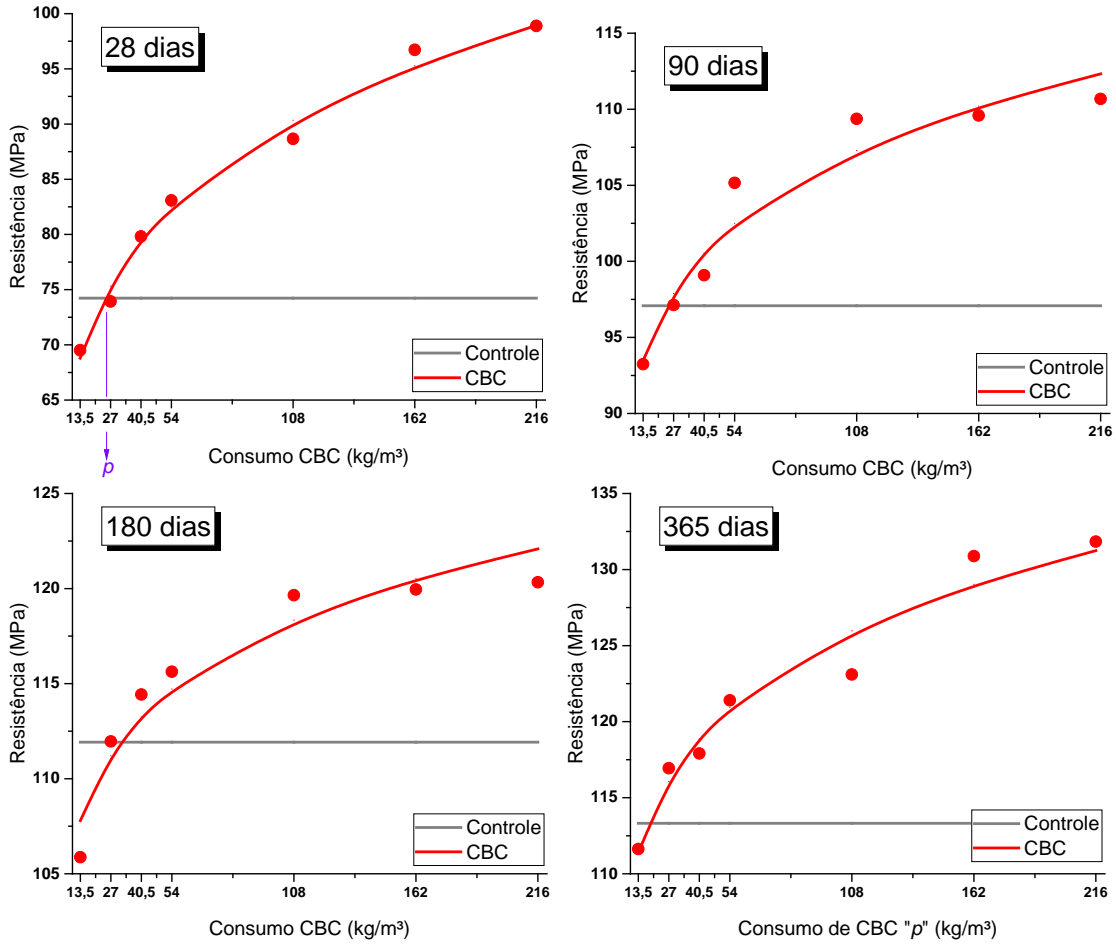
Segundo Ho e Lewis (1985) e Gopalan (1995), a metodologia proposta neste capítulo para obtenção do fator  $k$  de eficácia cimentante baseia-se na razão entre o consumo de cimento substituído e consumo de CBC adicionado, para misturas com resistências mecânicas similares.

Assim, para manter as propriedades mecânicas, cada curva obtida pelo incremento no consumo de pozolana será correlacionada com a reta que indica o valor de resistência mecânica do traço controle, conforme descrito no item 9.1. A partir da intersecção desta reta com a curva, se obtém o consumo “ $p$ ” de CBC, índice este que será usado para obter o valor do fator  $k$  de eficácia cimentante por meio da equação 9.10 abaixo:

$$k = \frac{c_1 - c_2}{p} \quad (9.10)$$

Neste sentido, com base no modelo Potencial, são plotadas as curvas teóricas ajustadas aos dados experimentais de Resistência à Compressão de Microconcretos em relação ao Consumo de CBC adicionado nas misturas. As Figuras 9.18 a 9.22 representa cada grupo de misturas em relação ao consumo de cimento Portland reduzido, para diferentes tempos de cura. Também são indicados os pontos para obtenção do consumo “ $p$ ” de CBC.

Figura 9.18 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $p$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 54C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9.19 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $p$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 36C – B.

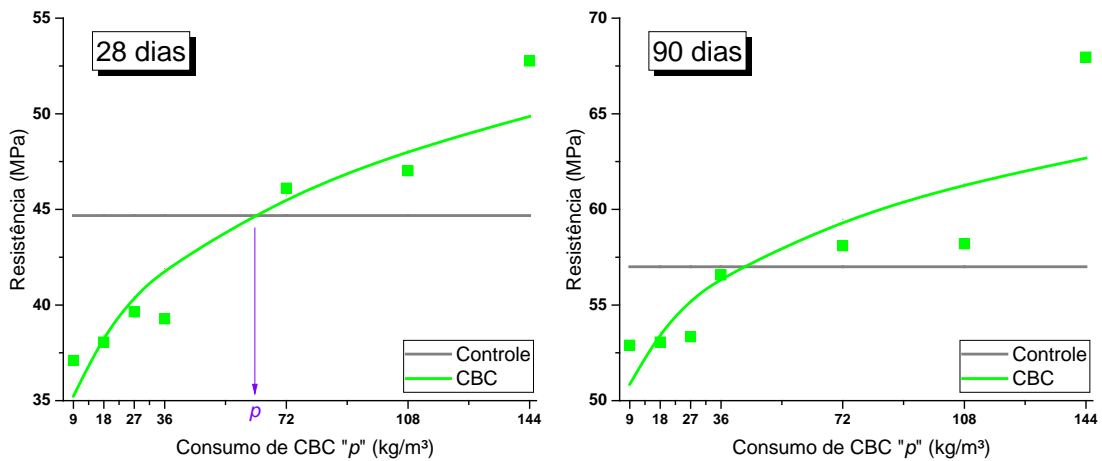
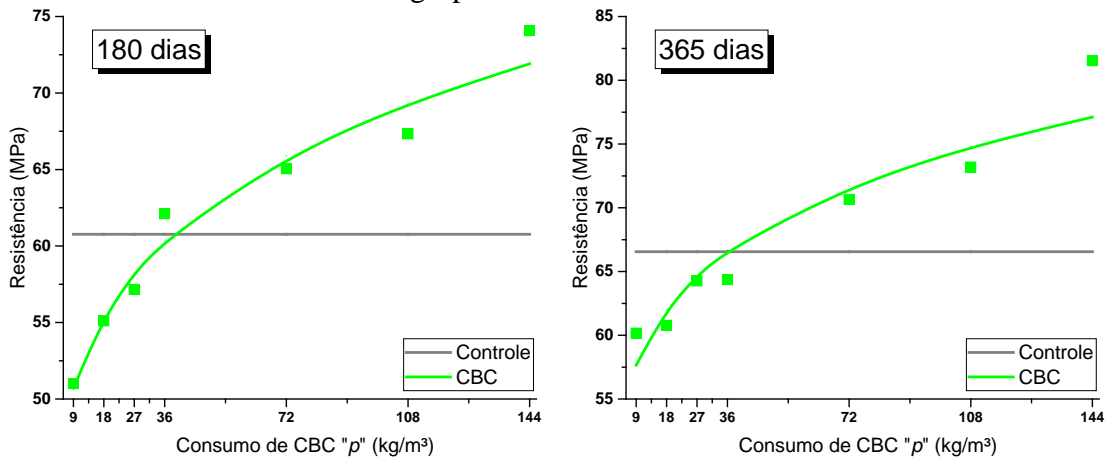


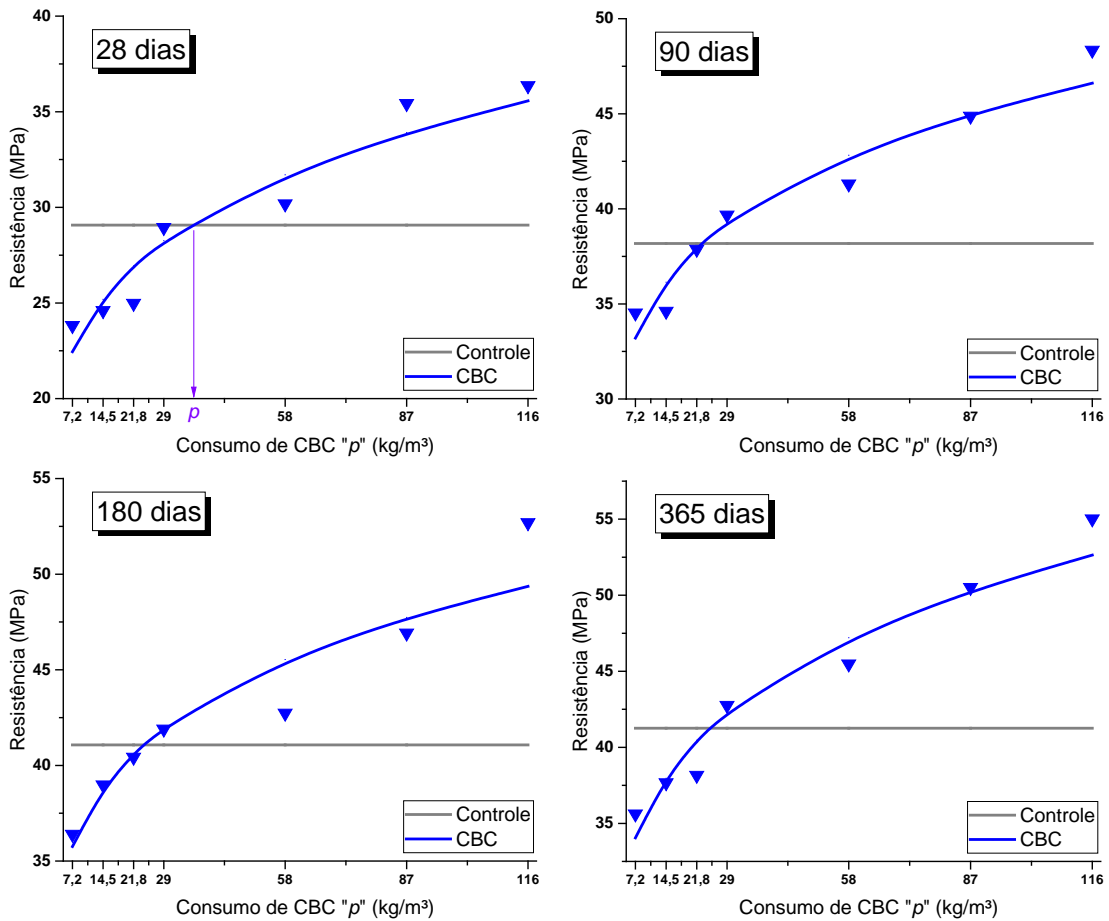


Figura 9.19 (Continuação) – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $p$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 36C – B.



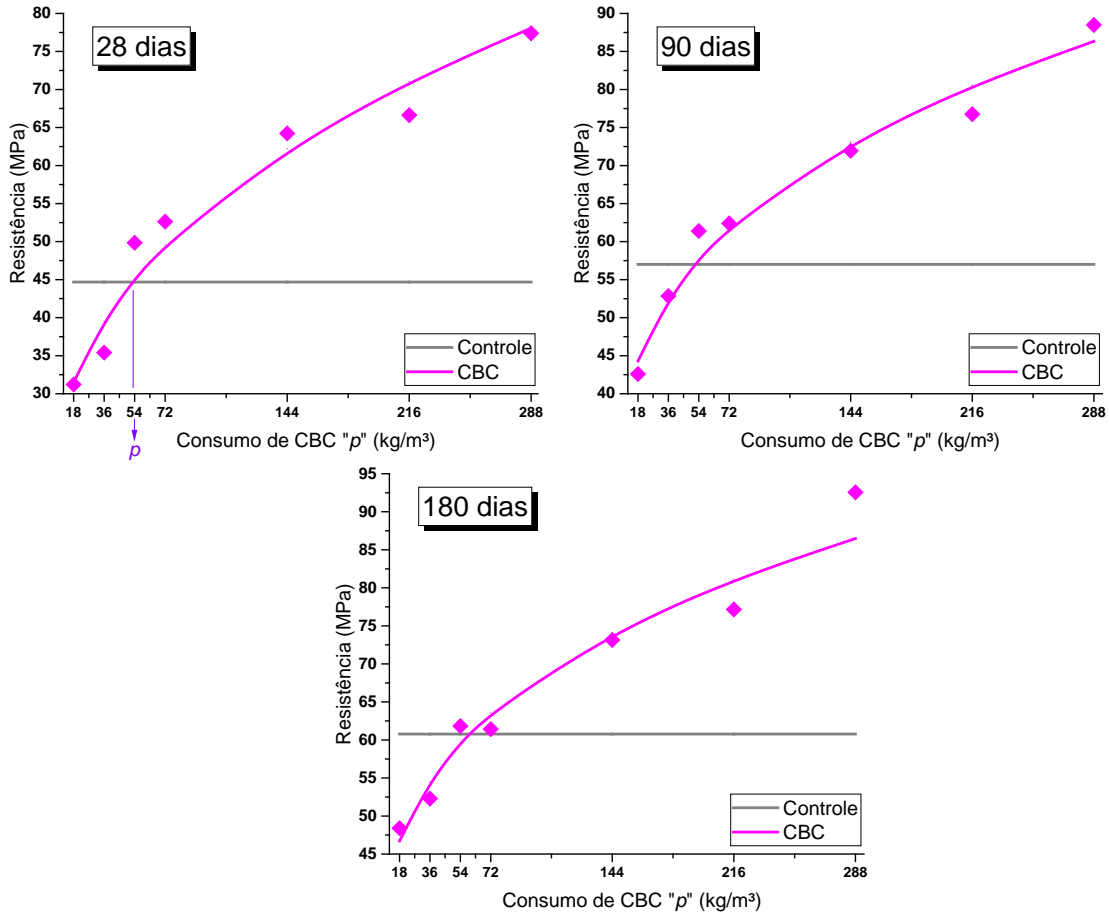
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9.20 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $p$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 29C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9.21 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $p$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 72C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9.22 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $p$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 108C – B.

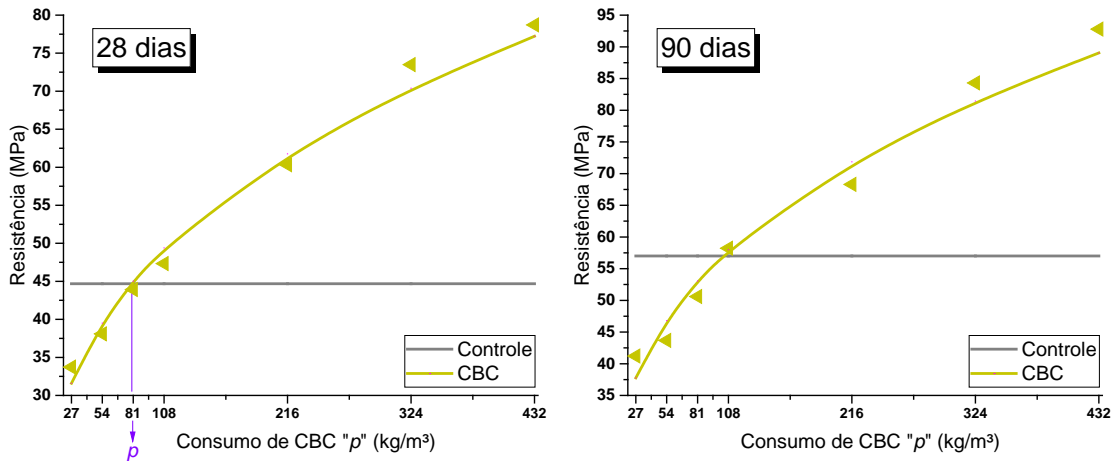
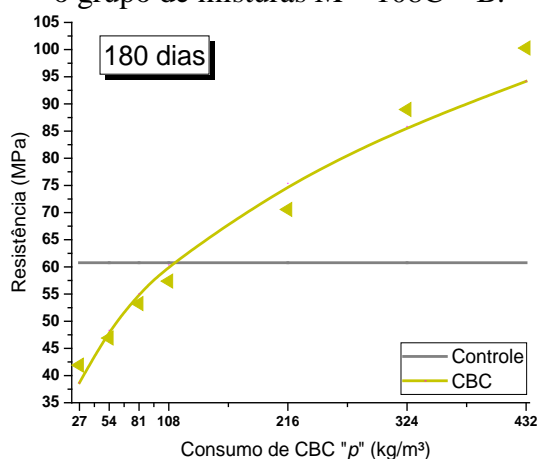


Figura 9.22 (Continuação) – Curvas Teóricas  $R_c \times p$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 108C – B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 9.4.4 Avaliação das Curvas Teóricas “ $R_c \times p$ ” ajustadas aos dados experimentais

Inicialmente, se observa que, para todos os teores de cimento substituídos, a inclusão de CBC proporciona aumento de resistência à compressão, e este aumento é diretamente proporcional ao consumo de material pozolânico adicionado.

Em relação ao tempo de cura, fica evidente que, após 90 dias, existe uma tendência de estabilização das resistências mecânicas à compressão dos microconcretos.

O modelo potencial apenas conduziu uma discrepância maior dos dados para os grupos de Misturas M – 36C – B e M – 29C – B e para altos consumos de pozolana. De fato, os menores valores de erro relativos médio e coeficiente de correlação foram observados para o grupo de misturas M – 36C – B. Neste quesito, poderia se ter aplicado o modelo linear para ajuste dos dados experimentais, entretanto se verificou que o modelo potencial descreve melhor o comportamento dos dados experimentais próximo ao ponto de encontro da reta do controle com a curva da CBC.

Ao mesmo tempo, se verificou que o modelo linear não ajustou de maneira coerente os dados experimentais do grupo de misturas M – 54C – B. De fato, este modelo conduziria a uma melhor aproximação dos dados experimentais para altos consumos de CBC, entretanto para menores consumos tais pontos seriam distanciados, o que poderia gerar um comportamento mais discrepante dos valores de  $k$  em relação ao consumo de pozolana  $p$  obtido de maneira experimental.

O modelo potencial também serviu de base para descrever que as resistências mecânicas apresentaram um comportamento distinto quanto ao teor de CBC incorporada às misturas. É evidente que, para consumos de CBC menores ou análogos à porcentagem de cimento

substituída, o incremento de resistência é mais substancial, mostrando maior inclinação da curva. Ao mesmo tempo, para consumos de CBC acima da porcentagem de cimento substituído, as curvas tendem a apresentar uma inclinação menor, evidenciando uma tendência de estabilização das resistências mecânicas à compressão.

A partir desta influência, se conclui que os métodos de dosagem propostos para obtenção do fator  $k$  em termos da Resistência à Compressão x Consumo de Pozolana fornecem resistências muito satisfatórias quando se adiciona baixos e médios consumos de CBC em relação ao teor de cimento substituído.

#### 9.4.5 Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante

Serão avaliados neste tópico os valores dos coeficientes  $k$  de eficácia cimentante de microconcretos com adição de CBC, definidos pela razão entre o consumo de cimento Portland removido e o consumo de CBC adicionado.

Sendo assim, a Tabela 9.19 abaixo mostra os valores de  $k$  frente ao tempo de cura, fator água/cimento dos traços controle, consumos de Cimento Portland reduzido ( $c_1 - c_2$ ), além do consumo “ $p$ ” e porcentagem de CBC incrementada para manter as mesmas propriedades de resistência à compressão. Para efeitos de comparação, serão fornecidos os valores de “ $p$ ” e  $k$  obtidos por meio das curvas experimentais e teóricas.

Tabela 9.19 – Resultados dos Valores de fator  $k$  para Microconcretos com CBC em termos de Resistência à Compressão e Consumo de CBC adicionado.

Grupo	Tempo (dias)	(a/c) Controle	Consumo de Cimento reduzido ( $c_1 - c_2$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	% CBC	Experimental		Teórico (Modelo Potencial)	
					$p$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$	$p$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$
M-54C-B	28	0,3	54,00	5,34	27,68	<b>1,95</b>	24,13	<b>2,24</b>
	90		54,00	5,21	26,84	<b>2,01</b>	23,85	<b>2,26</b>
	180		54,00	5,28	26,90	<b>2,01</b>	31,15	<b>1,73</b>
	365		54,00	3,56	17,80	<b>3,03</b>	18,01	<b>3,00</b>
M-36C-B	28	0,5	36,00	15,44	64,46	<b>0,56</b>	59,97	<b>0,60</b>
	90		36,00	11,13	46,14	<b>0,78</b>	40,84	<b>0,88</b>
	180		36,00	10,48	33,56	<b>1,07</b>	37,87	<b>0,95</b>
	365		36,00	9,85	48,46	<b>0,74</b>	35,33	<b>1,02</b>
M-29C-B	28	0,65	29,00	11,58	31,82	<b>0,91</b>	34,39	<b>0,84</b>
	90		29,00	8,04	23,00	<b>1,26</b>	22,71	<b>1,28</b>
	180		29,00	8,40	24,91	<b>1,16</b>	23,86	<b>1,22</b>
	365		29,00	8,68	26,64	<b>1,09</b>	24,61	<b>1,18</b>
M-72C-B	28	0,5	72,00	15,38	47,63	<b>1,51</b>	52,37	<b>1,37</b>
	90		72,00	15,08	44,78	<b>1,61</b>	51,29	<b>1,40</b>
	180		72,00	16,94	52,00	<b>1,38</b>	58,77	<b>1,23</b>
M-108C-B	28	0,5	108,00	23,90	87,10	<b>1,24</b>	79,09	<b>1,37</b>
	90		108,00	28,84	103,66	<b>1,04</b>	102,16	<b>1,06</b>
	180		108,00	30,36	135,61	<b>0,80</b>	110,30	<b>0,98</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 9.4.6 Discussão dos resultados obtidos

A avaliação inicial do método aplicado permite concluir que os valores de eficácia cimentante de microconcretos constituídos de Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar estão sob influência do tempo de cura das amostras, relação água/cimento efetiva, consumo de cimento reduzido e consumo de CBC incrementada.

Além disso, o modelo de ajuste Potencial proporcionou um comportamento bem similar quanto aos valores de eficácia obtidos através dos dados experimentais, principalmente no que diz respeito à evolução da  $k$  ao longo do tempo de cura.

Para todas as relações água/cimento, se observa valores de  $k$  maiores que 1, nas quais se pode substituir cimento por um consumo menor de pozolana para alcançar uma mesma resistência, mantendo-se a relação a/c. Os valores menos expressivos de eficácia foram observados apenas para as misturas com a/c = 0,5 e 10% de redução no consumo de cimento Portland; por outro lado, valores significativos de  $k$  foram obtidos para as dosagens com relação a/c baixa, mostrando que é possível se obter misturas sem e com adição de pozolana utilizando um consumo de CBC em até 3 vezes menos que o consumo de cimento substituído, para manter as mesmas propriedades mecânicas.

Em relação ao tempo de cura, o comportamento obtido vem de encontro à tendência de reatividade pozolânica tardia da CBC. Os maiores valores de coeficiente de eficácia  $k$  foram obtidos aos 90 e 365 dias de cura, mostrando uma tendência de redução da eficácia aos 180 dias de cura.

Valores de  $k$  muito altos foram obtidos para as misturas com traços ricos M – 54C – B, chegando ao seu ponto máximo de eficácia aos 365 dias de cura. Isso mostra que a fase líquida presente na pasta de cimento com CBC, mesmo em misturas com relação a/c baixa, se mostra o suficiente para facilitar as reações pozolânicas, que implica na dissolução da portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e as reações com a pozolana.

Ao mesmo tempo, maiores consumos de cimento proporcionam maior quantidade de portlandita disponível para as reações, que, associado a ambientes altamente alcalinos, pode forçar as pozolanas a reagirem em maior velocidade.

Para relações a/cm compreendidos entre 0,27 e 0,33, Wong e Razak (2005) obtiveram resultados de eficácia cimentante entre 1,6 e 2,3 para concretos com adição de metacaulim, aos 28 dias de cura, enquanto que concretos com sílica ativa proporcionaram coeficientes  $k$  entre 2,1 e 3,1. Aos 180 dias de cura, os valores de  $k$  variaram de 1,8 a 4,0 para misturas de metacaulim e de 2,4 a 3,3 para concretos com sílica ativa.

Entretanto, mesmo com menores consumos de cimento e relação a/c maior, o grupo de misturas M – 29C – B forneceu valores de  $k$  acima de 1. Mais uma vez, se verifica que a CBC pode ter uma capacidade maior de fixação da portlandita a longas idades, particularmente aos 90 dias para este grupo de mistura. Mesmo assim, não foram verificados aumentos substanciais nos valores de  $k$  quando se aumenta o consumo de água, mostrando mais uma vez que a CBC não é um material de característica hidráulica.

Fixando a relação a/c = 0,5, verifica-se um comportamento habitual para os grupos de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B, isto é, à medida em que se aumenta consumo de cimento Portland a ser removido, incrementos na porcentagem de CBC também são detectados.

O grupo de misturas M – 72C – B fornecem coeficientes de eficácia superiores aos grupos M – 36C – B e M – 108C – B. Neste caso, os efeitos de menor consumo de Cimento Portland reduzido e a maior quantidade de portlandita disponível para as reações não se mostraram em conformidade com o incremento de eficácia das CBC. De fato, ao se reduzir 72 kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland, os coeficientes de eficácia são mais significativos do que para misturas com reduções de 36 kg/m<sup>3</sup> e 108 kg/m<sup>3</sup> de cimento.

A Tabela 9.19 evidencia que os grupos M – 72C – B e M – 108C – B indicam porcentagens superiores de CBC em relação às demais misturas, podendo sugerir novamente que os efeitos físicos são os responsáveis pelo desempenho das misturas nas primeiras idades.

Neste contexto, aos 28 dias de cura, o efeito de nucleação heterogênea ainda parece ser expressivo, porque, embora a porcentagem de CBC seja maior para o grupo M – 108C – B (da ordem de 30%), o valor de  $k$  se iguala ao valor obtido para o grupo M – 72C – B, com aproximadamente 15% de CBC. Neste caso, o efeito de diluição não é expressivo, considerando que a relação água /cimento efetiva é constante para todas as dosagens.

A longas idades, o grupo M – 108C – B fornece valores de eficácia menores em relação ao grupo M – 72C – B. Neste quesito, também pode-se atribuir os efeitos causados pela redução da portlandita disponível na mistura com menor consumo de cimento, associado ao caráter não reativo da sílica presente em altas porcentagens de CBC.

#### 9.4.7 Comparação do Fator $k$ de Eficácia Cimentante entre os Modelos “Resistência à Compressão x Relação a/c” e “Resistência à Compressão x Consumo de CBC”

A partir dos resultados obtidos no item anterior, pretende-se realizar a comparação dos valores de fator  $k$  em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” e “Resistência à Compressão x Consumo CBC”, especificados nas Partes 4 e 5 dos resultados, respectivamente.

Atribuindo-se as relações água/cimento igual a 0,3, 0,5 e 0,65 e 10% de redução no consumo de Cimento Portland, são avaliadas as curvas representadas na Figura 9.23 abaixo. Para isso, os valores de  $k$  em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” serão referenciados como Metodologia (1), para 15% (M-15) e 30% (M-30) de substituição de Cimento por CBC; além disso, o número (2) será utilizado para identificar os valores de  $k$  teóricos em termos de “Resistência à Compressão x Consumo CBC”.

Para a identificação (2), fica explícito que:

- $a/c = 0,3$  para o grupo de misturas M – 54C – B;
- $a/c = 0,5$  para o grupo de misturas M – 36C – B;
- $a/c = 0,65$  para o grupo de misturas M – 29C – B;

Figura 9.23 - Comparação do Fator  $k$  de eficácia cimentante entre os Modelos “Resistência à Compressão x Relação a/c” e “Resistência à Compressão x Consumo CBC”, para diferentes relações água/cimento dos traços controle.

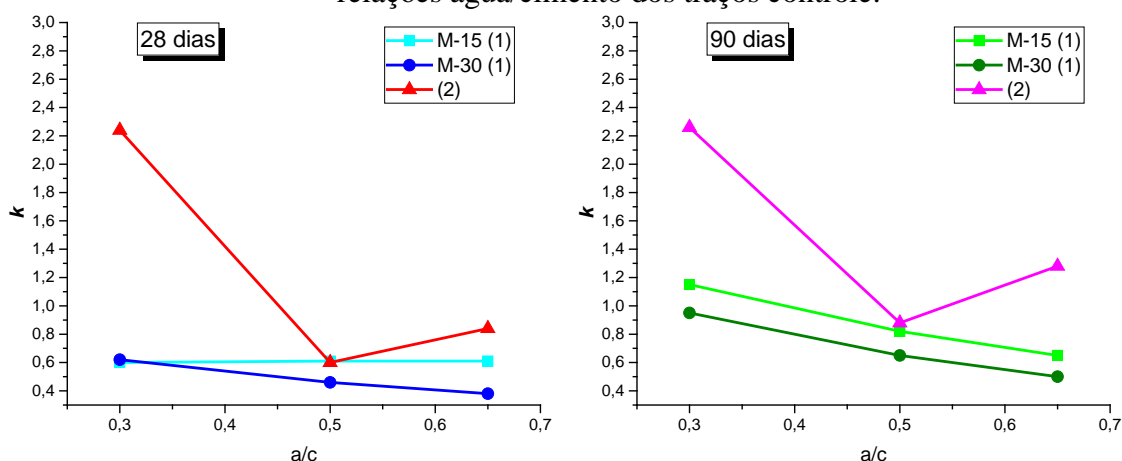
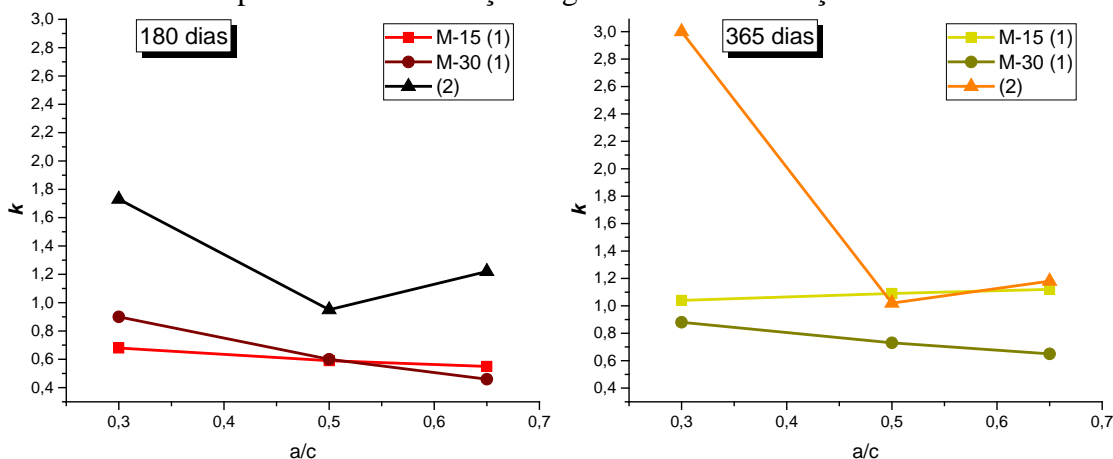


Figura 9.23 (Continuação) - Comparação do Fator  $k$  de eficácia cimentante entre os Modelos “Resistência à Compressão x Relação  $a/c$ ” e “Resistência à Compressão x Consumo CBC”, para diferentes relações água/cimento dos traços controle.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Inicialmente, deve-se levar em questão que o comportamento do fator  $k$  em termos de “Resistência à Compressão x Consumo CBC” (2) é bastante similar ao longo do tempo de cura para as três relações água/cimento. Apesar da influência de diversos consumos de CBC e Cimento Portland, teores de aditivos superplastificantes e relações água/material cimentante na elaboração das dosagens, são verificadas boas condições de ensaios.

Não se verifica uma tendência similar entre os valores de fator  $k$  para as metodologias (1) e (2), entretanto pode-se observar que existe uma tendência de aproximação dos valores quando se refere a relações água/cimento médias e altas, e de maneira ainda mais próxima para os traços com  $a/c = 0,5$ .

Se verifica que os valores de  $k$  obtidos pelo método (2) são muito maiores que os valores especificados pelas normas Europeias EHE-08 e EN 206-1:2013 tanto para a cinza volante quanto para a sílica ativa. Valente et al. (2010) também obteve as mesmas conclusões quando se utilizou o método para cálculo do fator  $k$  em termos de “Resistência à Compressão x Consumo CBC”.

Analogamente ao método (1), o método (2) também proporcionou a obtenção de  $k$  menores aos 180 dias de cura, em relação aos 90 e 365 dias. Ao mesmo tempo, aos 180 dias de cura, foi observada uma discrepância maior entre os valores de  $k$  considerando os dois modelos, sendo estes valores maiores para o modelo (2).

Os dados de eficácia são bem elevados para relações água/cimento baixas, referentes ao modelo (2) ou grupo de misturas M – 54C – B. Para todas as idades de cura, estes valores superam em grande amplitude os valores de  $k$  obtidos pelo método (1) para 15% e 30% de substituição de cimento por CBC.

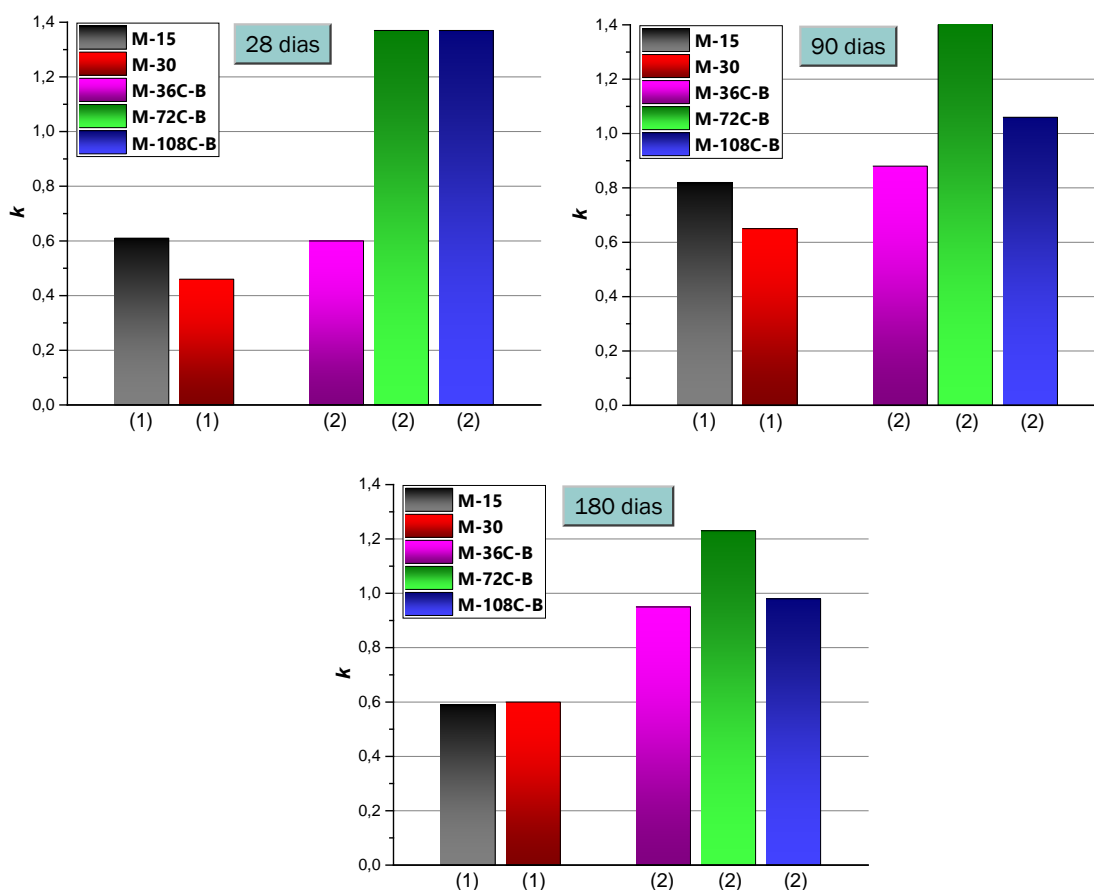


Em particular ao último modelo, quando se observa o consumo de CBC equivalente “ $p$ ” (Tabela 9.19), para se ter as mesmas propriedades mecânicas que as misturas controle, fica evidente que estes valores são sempre menores que o valor de cimento substituído ( $c_1 - c_2$ ), mostrando que baixas porcentagens de CBC foram obtidas para garantir esta propriedade. Sendo assim, este aumento da eficácia em relação ao método (1) parece ser influenciado pelo consumo de CBC, visto que baixos consumos de material pozzolânico proporcionaram melhorias significativas nos valores de resistência mecânica.

Para o grupo de misturas M – 54C – B, os valores de  $k$  obtidos estiveram associados a baixas porcentagens de CBC, da ordem de 3 a 5%. Enquanto que, para as misturas M – 36C – B se obtiveram porcentagens de 9 a 16%, e para as misturas M – 29C – B chegou-se ao intervalo de 8 a 12%. Babu e Hao (1993) analisaram o fator de eficácia cimentante em termos de resistência à compressão para concretos com adição de cinza volante, levando-se em conta diferentes porcentagens de substituição de material pozzolânico; sendo assim, os autores concluíram que os maiores valores de  $k$  foram obtidos para 10% de cinza volante, sendo que, até 20% de substituição, os valores não foram muito afetados. O mesmo efeito foi obtido para concretos constituídos de sílica ativa, sendo que, para substituições de 10% e 15% em relação à massa de cimento, os menores teores proporcionam maiores coeficientes de eficácia (ALAEJOS e FERNÁNDEZ, 1993) ao mesmo tempo que Wong e Razak (2005) obtiveram  $k$  mais efetivos para 5% de material pozzolânico.

A seguir, também será feita uma comparação entre as misturas pertencentes à metodologia (2), identificadas como M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B, sendo que estas apresentam reduções de 10%, 20% e 30% de cimento Portland, respectivamente, e relação água/cimento das misturas controle sendo constante e igual a 0,5. Também serão levadas em conta as misturas M-15 e M-30 pertencentes ao método (1), para relação a/c fixada em 0,5. A Figura 9.24 abaixo mostra o efeito entre as duas metodologias.

Figura 9.24 - Comparação do Fator  $k$  de eficácia cimentante entre os Modelos “Resistência à Compressão x Relação a/c” e “Resistência à Compressão x Consumo CBC”, para traço controle com relação água/cimento igual a 0,5.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao se estudar os efeitos da incorporação de CBC em microconcretos com relação água/cimento igual a 0,5, percebe-se que a metodologia (2) proporciona valores mais significativos de eficácia cimentante. Os valores mais altos de  $k$  foram obtidos para o grupo de misturas M – 72C – B, com 20% de redução no consumo de Cimento Portland e aproximadamente 15% de CBC em relação à massa de Cimento.

Novamente, estes dados condizem com os efeitos causados pela inclusão de altos consumos de cinza volante e sílica ativa, quando teores de pozolana da ordem de 30% em relação à massa de cimento pode ocasionar reduções na eficácia cimentante de concretos.

Isto deixa evidente que, dos 28 para os 90 dias de cura, os incrementos de eficácia mais efetivos foram alcançados para as misturas com menor consumo de CBC (M – 15, M – 36C – B e M – 72C – B). Aos 180 dias de cura, novamente houve uma tendência de redução dos valores de  $k$  para a maioria das dosagens estudadas.

Apesar do grupo M – 36C – B evidenciar valores de  $k$  menores em relação aos grupos M – 72C – B e M – 108C – B, a taxa de crescimento dos valores de  $k$  ao longo tempo é maior para o primeiro grupo. Ao mesmo tempo, em particular às misturas com altas porcentagens de CBC (M-30 e M – 108C - B), nota-se que o efeito físico pode ser mais pronunciado nas primeiras idades, ao passo que o efeito pozolânico não se mostrou significativo a longas idades.

Apesar dos valores de  $k$  não apresentarem um comportamento gradual, esta última avaliação deixa claro a boa correlação entre as metodologias 1 e 2, quando se refere aos comportamentos relacionados com a alteração do consumo de pozolana e avanço no tempo de hidratação das amostras.

## 9.5 CÁLCULO DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE PARA MICROCONCRETOS COM ADIÇÃO DE INERTE

A partir do estudo das propriedades mecânicas avaliadas no item 9.3, será aplicada a metodologia para obtenção do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante para microconcretos com adição de um material inerte do ponto de vista pozolânico, em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de Material Cimentício.

Inicialmente, serão plotadas as curvas de resistências à compressão de microconcretos em relação ao consumo de quartzo adicionado, fornecidas por cada grupo de misturas M – 36C – I, isto é, referente ao traço Controle com  $a/cm = 0,5$  e demais traços com 10% de redução no Consumo de Cimento e adição de Inerte.

### 9.5.1 Modelos de ajuste das curvas “ $R_c$ x Consumo de Inerte”

A obtenção do consumo “ $i$ ” de quartzo triturado se dará de maneira experimental, e também utilizando o método de regressão das curvas experimentais para obtenção dos modelos teóricos. Diferentemente do ajuste aplicado às misturas com CBC, o modelo que melhor expressa o comportamento das curvas experimentais é o Modelo Polinomial de ordem 3.

Sendo assim, os valores teóricos de Resistência Mecânica à compressão serão obtidos por meio do consumo de material inerte  $i$ , seguindo a equação 9.11 modelo:

$$R_c = (A * i^3) + (B * i^2) + (C * i) + D \quad (9.11)$$

Onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são parâmetros de ajuste da equação.

A Tabela 9.20 abaixo mostra os parâmetros de ajuste do modelo proposto ao longo do tempo de cura, bem como o erro relativo médio e o coeficiente de Determinação, para os diferentes grupos de misturas com inclusões de quartzo triturado.

Tabela 9.20 – Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Consumo de Material Inerte.

Mistura	Tempo de Cura (dias)	A	B	C	D	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
M – 36C - I	28	2E-05	-0,0032	0,0862	36,73	5,452	0,943
	90	-2E-05	0,0057	-0,5191	51,798	5,271	0,882
	180	-7E-06	0,0038	-0,4635	56,44	2,943	0,864
	365	-5E-05	0,0123	-0,9068	62,351	7,704	0,851

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.5.2 Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação

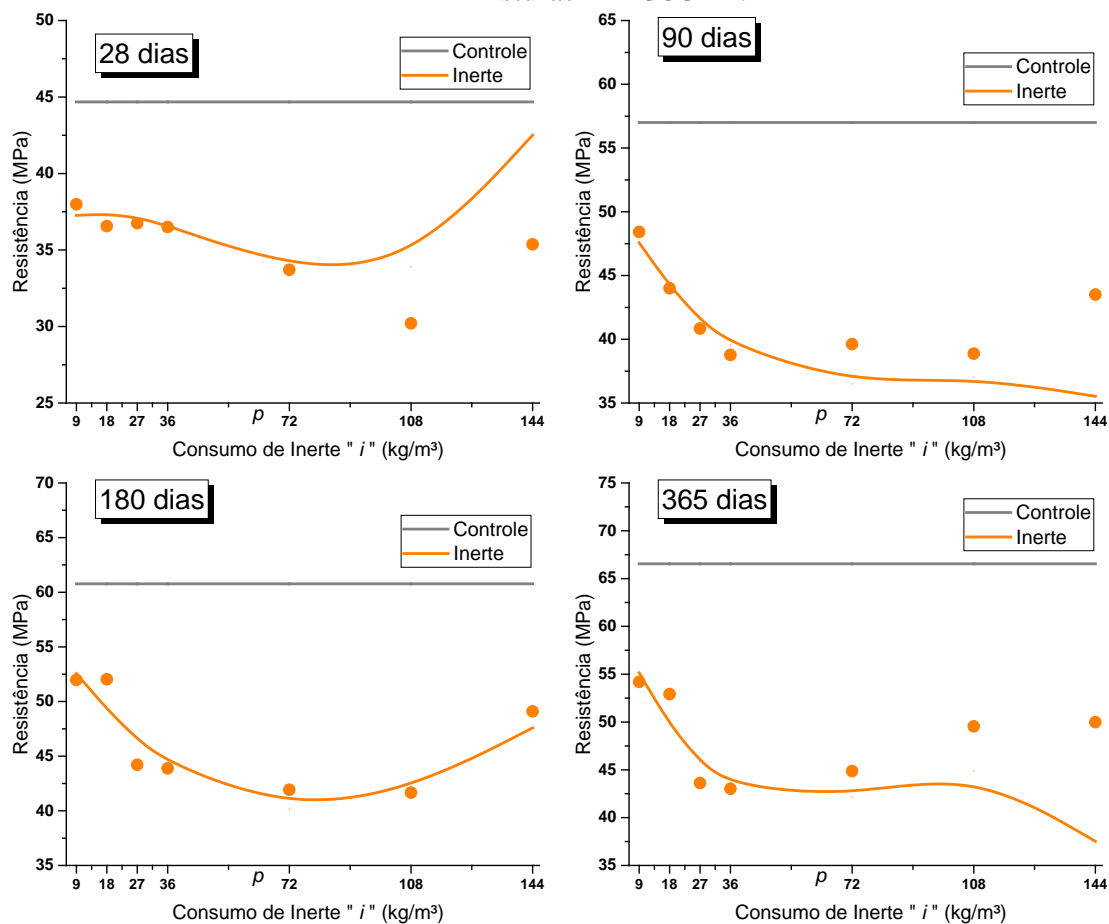
Se observa que o modelo proposto, no geral, proporcionou boa correlação para o grupo de misturas M – 36C – I, entretanto maiores valores de erro relativos médio e menores coeficientes de determinação foram obtidos em relação às curvas com CBC.

Os dados também indicam um comportamento mais dispersivo dos dados de consumo de material inerte frente à resistência à compressão para idades mais avançadas; de fato, a maior variabilidade dos dados de resistência mecânica ao longo do tempo pode estar atribuída ao comportamento não pozolânico do quartzo triturado.

### 9.5.3 Curvas Teóricas “Rc x Consumo de Inerte” ajustadas aos dados experimentais

Com base no modelo Polinomial, são plotadas as curvas teóricas ajustadas aos dados experimentais de Resistência à Compressão de microconcretos em relação ao Consumo de Quartzo Triturado adicionado nas misturas. A Figura 9.25 mostra este comportamento para diferentes tempos de cura.

Figura 9.25 – Curvas Teóricas  $R_c$  x  $\rho$  ajustadas aos dados experimentais, para o grupo de misturas M – 36C – I.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 9.5.4 Avaliação das curvas teóricas “ $R_c$ x Consumo de Inerte” ajustadas aos dados experimentais

Inicialmente, se observa que, para o consumo de cimento substituído, a inclusão de inerte não proporciona aumento de resistência à compressão, apresentando um comportamento de queda de resistência até um consumo aproximado de 108 kg/m<sup>3</sup> de quartzo. Para consumos acima deste valor, percebe-se um incremento nas propriedades mecânicas; mesmo assim, os dados de resistência à compressão não superaram os valores de tensão das amostras controle.

Ao mesmo tempo, verifica-se que o efeito de empacotamento pode ser mais expressivo para baixos consumos de material inerte, e que estes efeitos podem se manifestar mesmo a longas idades.

Quando se analisa os consumos de materiais dos traços com adição de material inerte, é interessante frisar que os consumos de cimento Portland e água se mantêm constantes à medida em que se incrementa o material não reativo. Ao mesmo tempo, quando se atribui o efeito do consumo de quartzo na relação a/cm (água/cimento+inerte), percebe-se que este fator é

reduzido à medida em que se adiciona material inerte. Portanto, é conveniente salientar que o efeito de redução nas propriedades mecânicas está condicionado à baixa reatividade do material, e que as reduções na relação água/material cimentício não exerce influência nessas propriedades.

### 9.5.5 Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante

O comportamento observado na Figura 9.25 deixa claro que, para quaisquer consumos de inerte adicionado, a resistência à compressão não supera os valores de tensão das amostras controle.

Sendo assim, fica evidente que, para manter mesmas propriedades mecânicas, as curvas obtidas pelo incremento no consumo de quartzo não poderão ser correlacionadas com a reta que indica o valor de resistência mecânica do traço controle, conforme descrito no item 9.1. Ou seja, não é possível obter a intersecção desta reta com a curva para se obter o consumo “ $i$ ” de material, índice este necessário para obter o valor do fator  $k$  de eficácia cimentante.

## 9.6 O CONCEITO DE “CIMENTO EQUIVALENTE” PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE DA CBC

### 9.6.1 Modelo de Cálculo do Fator $k$ de Eficácia Cimentante

A metodologia proposta neste capítulo tem como princípio o conceito de que o fator de eficácia cimentante provém da massa “ $p$ ” de cinza volante é equivalente à massa “ $kp$ ” de cimento em termos do desenvolvimento da resistência mecânica à compressão.

Estes conceitos então podem ser definidos pela Equação 9.12:

$$\left(\frac{a_1}{c_1}\right)_{Controle} = \left(\frac{a_2}{c_2+k*p}\right)_{Pozolana} \quad (9.12)$$

Smith (1967) ainda salienta que  $k$  é um valor assumido para cada classe de cinza volante e que esta condição é válida para a constância no consumo de água das misturas ( $a_1=a_2$ ). Portanto, a equação anterior fica:

$$c_{1Controle} = (c_2 + k * p)_{Pozolana} \quad (9.13)$$

Ou seja, considerando uma mistura de concreto com consumo “ $p$ ” de pozolana e consumo “ $c_2$ ” de cimento, “ $c_1$ ” é o consumo de cimento necessário para manter a mesma resistência à compressão da mistura sem pozolana. A diferença entre “ $c_1$ ” e “ $c_2$ ” é chamada de

“Cimento Equivalente” (“ $c_{eq}$ ”) e o fator  $k$  de eficácia cimentante é obtido pela razão entre “ $c_{eq}$ ” e “ $p$ ”.

Associando o método proposto em termos de resistência à compressão, Valente et al. (2010) descreve o modelo matemático Potencial para relacionar os valores de resistência mecânica com a relação água/cimento; nestas condições, deve-se levar em conta os parâmetros de ajuste  $A_1$  e  $A_2$ , que são dependentes do tempo de hidratação e tipo de cimento, conforme mostra a Equação 9.14:

$$Rc = A_1 \left( \frac{a_1}{c_1} \right)^{A_2} \quad (9.14)$$

Sendo assim, quando a pozolana é utilizada para a produção de concretos, a equação 9.15 anterior assume a forma:

$$Rc = A_1 \left( \frac{a_2}{c_2 + k * p} \right)^{A_2} = A_1 \left( \frac{a_2}{c_2 + c_{eq}} \right)^{A_2} \quad (9.15)$$

A partir desse método, se propõe obter os valores de  $k$  relacionando os consumos de água, consumo de cimento reduzido e parâmetros de ajuste  $A_1$  e  $A_2$  para cada resistência à compressão obtida, ao se incrementar “ $p$ ” consumo de CBC.

### 9.6.2 Dosagem das misturas de Microconcreto

Para a obtenção do fator  $k$  por meio do conceito de “Cimento Equivalente”, se utilizou a mesma gama de traços definidos no item 9.2 desta Parte. Considerando que o consumo de água deve se manter constante para todas as misturas ( $180 \text{ kg/m}^3$ ), foram selecionadas as dosagens de microconcretos sem adição de CBC que apresentassem fator  $a/c = 0,5$ , isto é, pertencentes aos grupos de misturas M – 36C – B, M – 72C – B e M – 108C – B.

A Tabela 9.21 abaixo representam os 25 traços selecionados para determinação da eficácia cimentante.

Tabela 9.21 – Dosagens de Microconcretos para obtenção do fator  $k$  de eficácia da CBC em termos do consumo de “Cimento Equivalente”.

Grupo	Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )					
						Cim.	Areia	B O	Pó P.	Água	CBC
Controle	M-C-0,5	5,500	0,5300	0,5000	0,000	<b>360,20</b>	880,68	660,24	440,16	<b>180,10</b>	0,00
	M-36C-0 B	6,210	0,5291	0,5560	0,000	<b>324,01</b>	912,03	660,05	440,03	<b>180,15</b>	0,00
	M-72C-0 B	7,090	0,5281	0,6250	0,000	<b>288,17</b>	942,99	660,09	440,06	<b>180,11</b>	0,00
	M-108C-0 B	8,224	0,5271	0,7140	0,000	<b>252,21</b>	974,04	660,10	440,07	<b>180,08</b>	0,00
M-36C-B	M-36C-9 B	6,015	0,5293	0,5403	2,710	<b>324,14</b>	903,90	660,06	440,04	<b>180,01</b>	9,03
	M-36C-18 B	5,833	0,5293	0,5268	5,270	<b>324,04</b>	895,09	660,11	440,07	<b>180,20</b>	18,03
	M-36C-27 B	5,661	0,5295	0,5130	7,695	<b>324,03</b>	887,09	660,10	440,07	<b>180,09</b>	27,01
	M-36C-36 B	5,498	0,5297	0,5000	10,000	<b>324,00</b>	879,08	660,07	440,05	<b>180,00</b>	36,00
	M-36C-72 B	4,910	0,5301	0,4548	18,190	<b>324,11</b>	845,00	660,13	440,09	<b>180,18</b>	72,06
	M-36C-108 B	4,425	0,5307	0,4165	25,000	<b>324,13</b>	812,08	660,18	440,12	<b>180,00</b>	108,04
	M-36C-144 B	4,013	0,5312	0,3850	30,770	<b>324,07</b>	778,41	660,05	440,03	<b>180,22</b>	144,03
M-72C-B	M-72C-18 B	6,615	0,5284	0,588	5,900	<b>288,25</b>	926,24	660,04	440,02	<b>180,12</b>	18,07
	M-72C-36 B	6,201	0,5286	0,5560	11,105	<b>288,09</b>	909,53	660,07	440,05	<b>180,19</b>	35,99
	M-72C-54 B	5,825	0,5288	0,5267	15,780	<b>288,15</b>	892,65	660,17	440,11	<b>180,20</b>	53,99
	M-72C-72 B	5,488	0,5292	0,5000	20,000	<b>288,13</b>	876,42	660,07	440,05	<b>180,08</b>	72,03
	M-72C-144 B	4,417	0,5302	0,4165	33,320	<b>288,30</b>	809,41	660,19	440,12	<b>180,08</b>	144,06
	M-72C-216 B	3,654	0,5313	0,3570	42,850	<b>288,26</b>	742,80	660,14	440,09	<b>180,07</b>	216,13
	M-72C-288 B	3,081	0,5323	0,3125	50,000	<b>288,23</b>	675,80	660,17	440,11	<b>180,14</b>	288,23
M-108C-B	M-108C-27 B	7,337	0,5275	0,6450	9,670	<b>252,27</b>	948,90	660,07	440,05	<b>180,13</b>	27,01
	M-108C-54 B	6,609	0,5279	0,5880	17,65	<b>252,21</b>	923,95	660,11	440,07	<b>180,09</b>	54,06
	M-108C-81 B	5,998	0,5283	0,5405	24,310	<b>252,26</b>	898,86	660,08	440,05	<b>180,14</b>	81,02
	M-108C-108 B	5,476	0,5286	0,5000	30,000	<b>252,30</b>	873,38	660,18	440,12	<b>180,21</b>	108,13
	M-108C-216 B	4,002	0,5303	0,3845	46,130	<b>252,28</b>	773,90	660,15	440,10	<b>180,06</b>	216,03
	M-108C-324 B	3,078	0,5318	0,3128	56,230	<b>252,22</b>	673,45	660,15	440,10	<b>180,25</b>	324,03
	M-108C-432 B	2,446	0,5335	0,2632	63,140	<b>252,25</b>	573,79	660,08	440,05	<b>180,12</b>	432,10

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.6.3 Resistência Mecânica à Compressão

A partir da redução do consumo de cimento e o correspondente aumento no consumo de CBC para diferentes classes de resistências, segue na Tabela 9.22 abaixo os resultados de resistência mecânica à compressão (média e desvio padrão) dos corpos de prova ao longo do tempo de cura.



Tabela 9.22 – Resistência à Compressão de Microconcretos para obtenção do fator  $k$  de eficácia da CBC em termos do consumo de “Cimento Equivalente”.

Grupo	Mistura	a/cm	Consumo CBC (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)		
				28	90	180
				Resistência à Compressão (MPa)		
Controle	M-C-0,5	0,5000	0,0	44,7 ± 2,7	57,0 ± 2,1	60,8 ± 1,1
	M-36C-0 B	0,5560	0,0	37,8 ± 2,5	47,4 ± 5,1	48,7 ± 1,7
	M-72C-0 B	0,6250	0,0	32,4 ± 5,0	39,1 ± 3,4	41,4 ± 1,3
	M-108C-0 B	0,7140	0,0	22,3 ± 1,5	36,3 ± 1,3	34,1 ± 1,7
M-36C-B	M-36C-9 B	0,5403	9,0	37,1 ± 6,0	52,9 ± 1,7	51,0 ± 1,3
	M-36C-18 B	0,5268	18,0	38,1 ± 3,6	53,1 ± 2,1	55,1 ± 2,6
	M-36C-27 B	0,5130	27,0	39,6 ± 5,7	53,3 ± 2,0	57,2 ± 1,5
	M-36C-36 B	0,5000	36,0	39,3 ± 1,1	56,6 ± 5,7	62,1 ± 0,0
	M-36C-72 B	0,4548	72,0	46,1 ± 1,3	58,1 ± 0,8	65,0 ± 1,5
	M-36C-108 B	0,4165	108,0	47,0 ± 2,5	58,2 ± 1,5	67,3 ± 1,7
	M-36C-144 B	0,3850	144,0	52,8 ± 2,1	68,0 ± 1,3	74,1 ± 0,5
M-72C-B	M-72C-18 B	0,5880	18,0	31,2 ± 6,2	42,6 ± 2,4	48,4 ± 2,4
	M-72C-36 B	0,5560	36,0	35,4 ± 0,5	52,8 ± 1,7	52,3 ± 0,9
	M-72C-54 B	0,5267	54,0	49,8 ± 2,2	61,4 ± 0,7	61,8 ± 0,7
	M-72C-72 B	0,5000	72,0	52,6 ± 1,0	62,4 ± 2,4	61,4 ± 0,7
	M-72C-144 B	0,4165	144,0	64,2 ± 1,4	71,9 ± 1,6	73,1 ± 1,0
	M-72C-216 B	0,3570	216,0	66,6 ± 0,5	76,8 ± 1,9	77,2 ± 1,2
	M-72C-288 B	0,3125	288,0	77,4 ± 1,2	88,5 ± 1,9	92,6 ± 2,0
M-108C-B	M-108C-27 B	0,6450	27,0	33,7 ± 1,8	41,2 ± 0,5	41,9 ± 1,7
	M-108C-54 B	0,5880	54,0	38,1 ± 1,0	43,7 ± 0,8	46,9 ± 1,9
	M-108C-81 B	0,5405	81,0	43,9 ± 1,4	50,6 ± 2,6	53,2 ± 2,0
	M-108C-108 B	0,5000	108,0	47,3 ± 1,2	58,2 ± 0,4	57,4 ± 1,1
	M-108C-216 B	0,3845	216,0	60,3 ± 1,8	68,3 ± 1,1	70,6 ± 0,8
	M-108C-324 B	0,3128	324,0	73,5 ± 2,8	84,3 ± 1,5	89,0 ± 0,9
	M-108C-432 B	0,2632	432,0	78,7 ± 1,6	92,8 ± 3,7	100,3 ± 0,8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 9.6.4 Parâmetros de ajuste das curvas $R_c$ x $a/c$

Os parâmetros  $A_1$  e  $A_2$  foram obtidos a partir das misturas controle, para os diversos tempos de cura. Sendo assim, atribuiu-se diferentes consumos de cimento para o traçado das curvas, conforme modelo potencial.

Tabela 9.23 – Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Correlação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos de “Cimento Equivalente”.

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$A_1$	$A_2$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
Controle	28	11,565	-1,975	0,021	0,996
	90	23,743	-1,232	0,021	0,985
	180	19,821	-1,585	0,017	0,991

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.6.5 Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação

Inicialmente, verifica-se que os Parâmetros de Ajuste  $A_1$  e  $A_2$  foram obtidos por meio de quatro tipos de misturas caracterizadas como “Controle”. Apesar de se ter utilizado um número menor de traços em relação aos demais métodos traçados até o momento, verifica-se que o modelo Potencial novamente proporcionou ótima correlação entre a Resistência Mecânica e a relação água/cimento. Valores muito altos de coeficiente de determinação foram obtidos, ao mesmo tempo em que foram constatados valores muito baixos de erro médio relativo.

### 9.6.6 Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante

Aplicando-se os valores obtidos dos parâmetros de ajuste  $A_1$  e  $A_2$ , é possível obter os resultados do consumo de “Cimento Equivalente” para cada uma das adições de CBC em relação ao consumo de Cimento Portland reduzido e idade de cura. Sabendo que a expressão “Cimento Equivalente” corresponde a “ $kp$ ”, conduz-se à obtenção do fator  $k$  de eficácia cimentante conforme a Tabela 9.24 abaixo:

Tabela 9.24 – Resultados dos Valores de fator  $k$  de eficácia cimentante para Microconcretos com CBC em termos de Resistência à Compressão e Consumo de CBC adicionado, pelo conceito de “Cimento Equivalente”.

Grupo	Mistura	Consumo CBC “ $p$ ” (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)					
			28		90		180	
			$c_{eq}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$	$c_{eq}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$	$c_{eq}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$
M-36C-B	M-36C-9 B	9	-7,62	<b>-0,85</b>	10,03	<b>1,11</b>	1,57	<b>0,17</b>
	M-36C-18 B	18	6,61	<b>0,37</b>	24,51	<b>1,36</b>	20,01	<b>1,11</b>
	M-36C-27 B	27	15,22	<b>0,56</b>	33,26	<b>1,23</b>	31,28	<b>1,16</b>
	M-36C-36 B	36	21,47	<b>0,60</b>	39,61	<b>1,10</b>	39,50	<b>1,10</b>
	M-36C-72 B	72	37,00	<b>0,51</b>	55,37	<b>0,77</b>	60,09	<b>0,83</b>
	M-36C-108 B	108	46,41	<b>0,43</b>	64,90	<b>0,60</b>	72,68	<b>0,67</b>
	M-36C-144 B	144	53,23	<b>0,37</b>	71,81	<b>0,50</b>	81,85	<b>0,57</b>
M-72C-B	M-72C-18 B	18	10,78	<b>0,60</b>	10,50	<b>0,58</b>	21,07	<b>1,17</b>
	M-72C-36 B	36	47,18	<b>1,31</b>	53,79	<b>1,49</b>	52,59	<b>1,46</b>
	M-72C-54 B	54	70,50	<b>1,31</b>	81,97	<b>1,52</b>	72,50	<b>1,34</b>
	M-72C-72 B	72	88,01	<b>1,22</b>	103,35	<b>1,44</b>	87,33	<b>1,21</b>
	M-72C-144 B	144	133,82	<b>0,93</b>	160,11	<b>1,11</b>	125,62	<b>0,87</b>
	M-72C-216 B	216	163,16	<b>0,76</b>	197,05	<b>0,91</b>	149,79	<b>0,69</b>
	M-72C-288 B	288	185,20	<b>0,64</b>	225,09	<b>0,78</b>	167,80	<b>0,58</b>
M-108C-B	M-108C-27 B	27	47,29	<b>1,75</b>	10,22	<b>0,38</b>	22,36	<b>0,83</b>
	M-108C-54 B	54	83,15	<b>1,54</b>	60,09	<b>1,11</b>	63,70	<b>1,18</b>
	M-108C-81 B	81	106,09	<b>1,31</b>	93,55	<b>1,15</b>	90,72	<b>1,12</b>
	M-108C-108 B	108	123,31	<b>1,14</b>	119,44	<b>1,11</b>	111,27	<b>1,03</b>
	M-108C-216 B	216	168,27	<b>0,78</b>	190,06	<b>0,88</b>	166,01	<b>0,77</b>
	M-108C-324 B	324	197,03	<b>0,61</b>	237,45	<b>0,73</b>	201,77	<b>0,62</b>
	M-108C-432 B	432	218,62	<b>0,51</b>	274,12	<b>0,63</b>	228,98	<b>0,53</b>

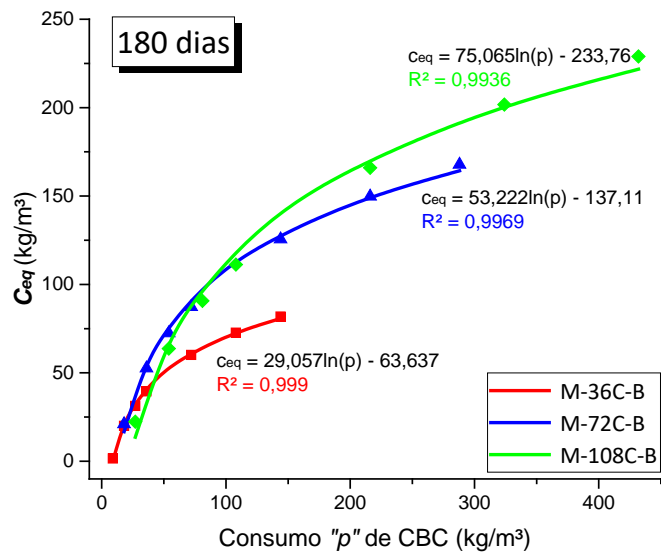
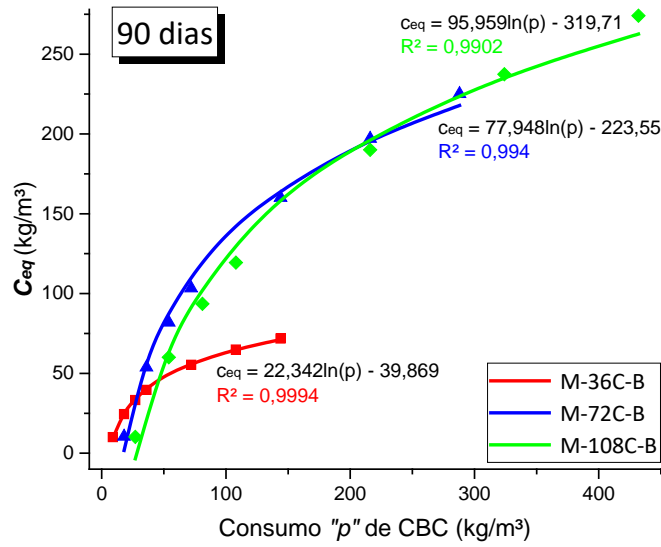
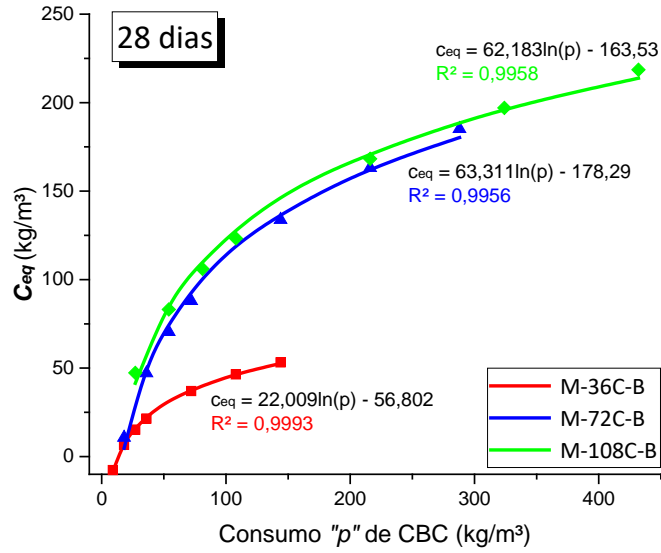
Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.6.7 Discussão dos resultados obtidos

Em primeiro lugar, realizou-se a comparação entre os dados de Cimento Equivalente “ $c_{eq}$ ” e o consumo “ $p$ ” de CBC, conforme mostra a Figura 9.26 abaixo, nas quais se permitiu obter uma correlação entre os dados por meio da regressão logarítmica.

O modelo logarítmico descreve este comportamento com precisão, apresentando valores bem expressivos do fator de determinação.

Figura 9.26 – Relação entre o Consumo “p” de CBC e o consumo de “Cimento Equivalente”, em termos de Resistência Mecânica à Compressão.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se que, para cada grupo de mistura, um aumento no consumo de CBC significa num aumento da Equivalência Cimentante “ $c_{eq}$ ”. Isso pode evidenciar a contribuição da CBC na conversão do produto de hidratação  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  do cimento em C-S-H. Ao mesmo tempo, este efeito pode estar associado aos incrementos nos valores de valores de resistência à compressão à medida em que se incrementa o consumo “ $p$ ” de CBC, porque, como o consumo de água é constante para todas as misturas, conseqüentemente constata-se reduções na relação a/cm.

O modelo de ajuste logarítmico obtido mostra que, quando o teor de CBC é alto, existe a tendência de estabilização do fator “Cimento Equivalente”, da mesma forma que obtido no item 9.4.3, para as Curvas Teóricas “ $R_c$  x Consumo de CBC” ajustadas aos dados Experimentais.

Por outro lado, Oner, Akyuz e Yildiz (2005), ao analisarem a correlação entre o Consumo “ $p$ ” de cinza volante e o consumo de Cimento Equivalente “ $c_{eq}$ ” em concretos, utilizaram o ajuste Potencial de ordem 2, nas quais indicou que, com o aumento do consumo de adição, existe um pico onde “ $c_{eq}$ ” é máximo, mas que reduz quando o consumo de cinza volante é alto. Estes resultados estiveram de acordo com os resultados de resistência à compressão obtidos pelos autores, nas quais indica que as propriedades mecânicas atingem seu máximo à medida em que se aumenta o consumo de cinza volante, mas que tem os valores de resistência reduzidos quando o teor de pozolana é elevado.

A partir da Tabela 9.24, a Figura 9.27 abaixo mostra a evolução do fator  $k$  de eficácia cimentante frente ao consumo de CBC adicionada.

Figura 9.27– Resultados dos Valores de fator  $k$  em função do consumo “ $p$ ” de CBC por meio do método de “Cimento Equivalente”.

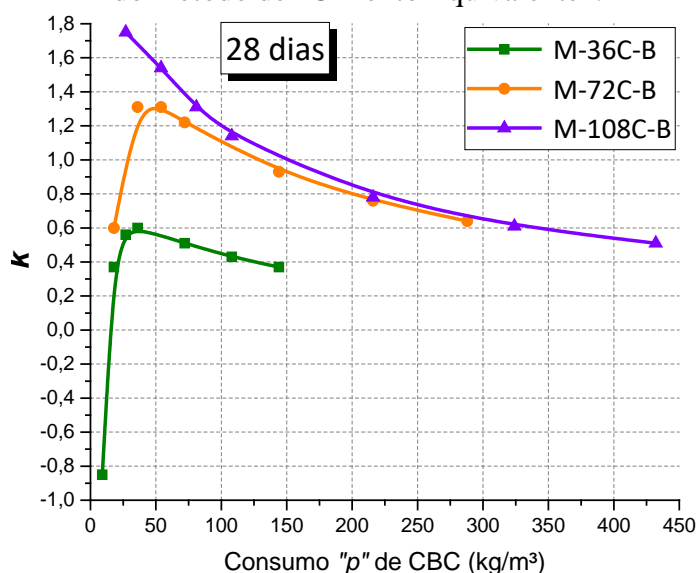
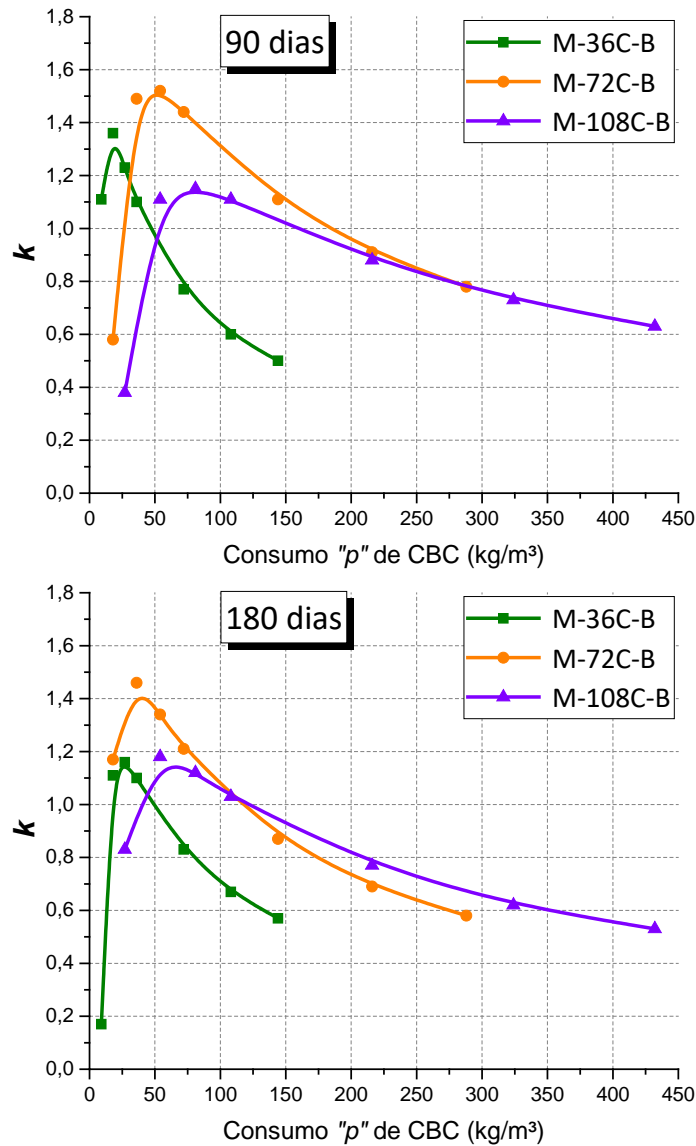


Figura 9.27 (Continuação) – Resultados dos Valores de fator  $k$  em função do consumo “ $p$ ” de CBC por meio do método de “Cimento Equivalente”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Reduzindo-se o consumo de cimento Portland para uma dada idade de cura e consumo de CBC adicionada, nota-se que o fator  $k$  de eficácia apresenta um comportamento gradual. Assim como observado nos resultados de fator  $k$  em termos de Resistência à Compressão x Consumo CBC, para relação água/cimento do traço controle igual a 0,5, os valores mais altos de  $k$  foram obtidos para o grupo de misturas M – 72C – B, com 20% de redução no consumo de Cimento Portland e incrementos de até aproximadamente 15% de CBC em relação à massa de Cimento.

A aplicação do conceito de Equivalência Cimentante “ $c_{eq}$ ” também confirma que, para teores de pozolana acima de 30% em relação à massa de cimento, se verifica reduções na eficácia cimentante de concretos ao longo do tempo de cura.

Aumentando-se o consumo de CBC para um dado consumo de cimento Portland reduzido, fica evidente que o fator  $k$  de eficácia cimentante é incrementado até atingir um pico, e então decresce. Isso mostra que existe um teor ótimo de CBC adicionada nas quais o fator de eficácia é máximo. Para todos os grupos de misturas, percebe-se que, após atingirem os picos, os valores de eficácia diminuem gradualmente com o aumento no consumo de CBC.

Isto é, associado ao caráter cristalino não reativo da CBC e à disponibilidade de portlandita do cimento, fica evidente novamente que apenas uma parcela da CBC pode participar das reações pozolânicas quando o teor de CBC é alto, e ainda outra parte do material continua não reagindo mesmo após longos períodos de cura.

Sendo assim, esta proposição mostra que, para um mesmo grupo de misturas, altos teores de CBC exerce uma influência mais significativa que a relação  $a/cm$ , visto que estas relações mais baixas (para as misturas M – 36C – B) não proporcionaram os maiores valores de fator  $k$ .

De acordo com a Tabela 9.24, é conveniente salientar que, quando se adiciona um consumo de material pozolânico igual ao consumo de Cimento Portland substituído, os valores de fator  $k$  são, em sua grande maioria, maiores que 1.

Dentro das 21 misturas analisadas para se obter o fator de eficácia cimentante, as que parecem exercer de maneira mais efetiva os efeitos físicos e químicos da CBC são as dosagens M – 36C – 27 B, M – 72C – 36 B e M – 108C – 54 B. Sendo assim, é interessante frisar que existe um comportamento onde o fator  $k$  de eficácia é máximo sempre para consumos de CBC menores que o consumo de cimento reduzido.

Ao avaliar todos os grupos de misturas ao longo do tempo de cura, pode-se inferir que, para estes traços mencionados, o teor de CBC que garantiria melhores eficácias cimentantes deveria estar compreendido entre 7% e 18% de substituição em massa de Cimento Portland por pozolana.

Isso mostra que, a medida em que se retira mais cimento da mistura, uma menor porcentagem de CBC é requerida para manter as propriedades mecânicas das misturas ao longo do tempo. Portanto, mantendo-se a relação  $a/c$  constante para a mistura controle, percebe-se que consumo de cimento reduzido e consumo de pozolana adicionado tem papel fundamental no comportamento da eficácia cimentante de microconcretos com Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar.

Os dados evidenciam que, a idades curtas, a eficácia da CBC é mais influente para maiores teores de cimento substituído (referente ao grupo M – 108C – B), em relação aos grupos M – 36C – B e M – 72C – B. Pode-se prever, portanto, que os efeitos físicos da CBC são mais pronunciados nas primeiras idades de cura quando o consumo de Cimento Portland reduzido é mais expressivo. Nestas condições, também se verifica que os valores mais altos de eficácia cimentante são obtidos para estas condições e adicionando-se baixos consumos de CBC; de fato, o fator de eficácia  $k = 1,75$  foi obtido para a mistura com  $108 \text{ kg/m}^3$  de Cimento reduzido e incremento de  $27 \text{ kg/m}^3$  de CBC, correspondente a aproximadamente 10% de CBC em relação à massa de Cimento Portland.

Em particular, quando o consumo de Cimento Portland reduzido e o teor de CBC foram menos expressivos nas primeiras idades (para o grupo M – 36C – 9B), registrou-se um único valor negativo de fator  $k$ , indicando, que para estas condições, a CBC poderia ser caracterizada como um material inerte. Entretanto, avaliando-se os demais valores de  $k$  obtidos pelas diversas metodologias exploradas no trabalho, não se pode generalizar tal efeito.

As curvas mostram que, dos 28 para os 90 dias de cura, os incrementos de eficácia mais efetivos foram alcançados para os grupos M – 36C – B e M – 72C – B, principalmente para o primeiro grupo. Para estas misturas, nota-se que o efeito pozolânico se mostrou significativo a longas idades. De fato, este método evidencia mais uma vez o efeito pozolânico a longo prazo da CBC quando se trabalha com menores teores de adição, ao mesmo tempo em que a redução menos expressiva de cimento Portland pode proporcionar uma disponibilidade maior de portlandita para as reações secundárias com a pozolana.

Em relação ao tempo de cura das amostras, novamente pressupõe-se que os valores mais efetivos de  $k$  estão aos 90 dias de idade. Em conformidade com os resultados de fator  $k$  em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” e “Resistência à Compressão x Consumo de CBC”, verifica-se queda de eficácia cimentante para alguns traços aos 180 dias, sendo que este efeito é bem pronunciado quando se adiciona altos consumos de CBC. Quando se adiciona menores consumos de CBC para um mesmo grupo de misturas, a eficácia parece ser mais efetiva aos 180 dias de cura.

A análise da Tabela 9.25 e Figura 9.28 abaixo permite concluir que, quando se avalia o comportamento dos valores de eficácia cimentante entre o modelo que leva em conta a “Resistência à Compressão x Consumo de CBC” (Metodologia 2) e a metodologia 3, que utiliza a teoria de “Cimento Equivalente”, são constatados resultados bastante similares. De forma análoga, este último modelo fornece dados superiores aos obtidos pela metodologia 1, em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c”.



Neste caso, os resultados comparativos de fator  $k$  foram obtidos tomando-se como base a proximidade entre o consumo “ $p$ ” de CBC incorporada nas misturas em relação ao consumo de cimento Portland.

Tabela 9.25 – Comparação dos Resultados de fator  $k$  para Microconcretos com CBC em relação às metodologias 1, 2 e 3.

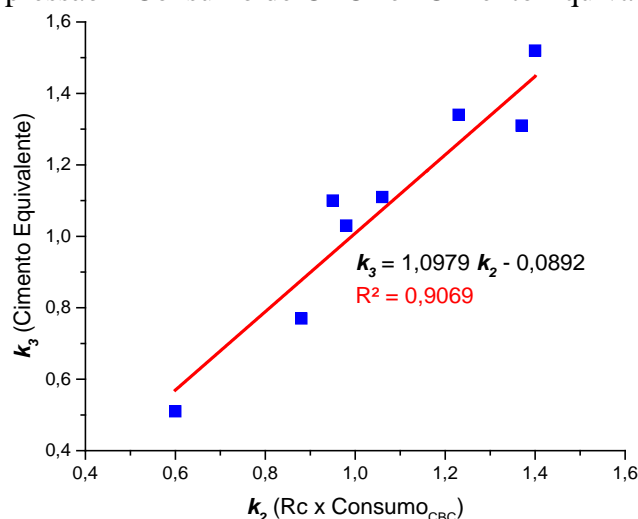
Tempo (dias)	Metodologia	Mistura	Consumo de CBC (kg/m <sup>3</sup> )	$k$
28	1	M – B15 – 0,5	54,0	<b>0,61</b>
	2	M – 36C – B	64,5	<b>0,60</b>
	3	M – 36C – 72 B	72,0	<b>0,51</b>
	2	M – 72C – B	47,3	<b>1,37</b>
	3	M – 72C – 54 B	54,0	<b>1,31</b>
	1	M – B30 – 0,5	107,8	<b>0,46</b>
	2	M – 108C – B	87,1	<b>1,37</b>
	3	M – 108C – 81 B	81,0	<b>1,31</b>
	90	1	M – B15 – 0,5	54,0
2		M – 36C – B	46,1	<b>0,88</b>
3		M – 36C – 36 B	36,0	<b>0,77</b>
2		M – 72C – B	44,8	<b>1,40</b>
3		M – 72C – 54 B	54,0	<b>1,52</b>
1		M – B30 – 0,5	107,8	<b>0,65</b>
2		M – 108C – B	103,7	<b>1,06</b>
3		M – 108C – 108 B	108,0	<b>1,11</b>
180		1	M – B15 – 0,5	54,0
	2	M – 36C – B	33,6	<b>0,95</b>
	3	M – 36C – 36 B	36,0	<b>1,10</b>
	2	M – 72C – B	52,0	<b>1,23</b>
	3	M – 72C – 54 B	54,0	<b>1,34</b>
	1	M – B30 – 0,5	107,8	<b>0,60</b>
	2	M – 108C – B	135,6	<b>0,98</b>
	3	M – 108C – 108 B	108,0	<b>1,03</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao mesmo tempo, se verifica a importância de se avaliar a metodologia (1), no que se refere aos efeitos da inclusão de altos valores no consumo de CBC e reduções expressivas nos valores de eficácia cimentante em relação aos demais métodos.

A correlação entre o fator  $k$  de eficácia cimentante em termos de “Resistência à Compressão x Consumo de CBC” e “Cimento Equivalente” se mostrou efetiva, visto que o ajuste linear obtido na Figura 9.28 forneceu um valor de coeficiente angular bem próximo a 1. Além disso, verificou-se um fator de correlação  $R = 0,952$ , mostrando a equivalência dos métodos empregados.

Figura 9.28 – Correlação entre o Fator  $k$  de eficácia cimentante em termos de “Resistência à Compressão x Consumo de CBC” e “Cimento Equivalente”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.7 O CONCEITO DE “CIMENTO EQUIVALENTE” PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE DO QUARTZO TRITURADO

Além do estudo da eficácia cimentante de Microconcretos constituídos de CBC, também se propôs neste capítulo a exploração dos valores de  $k$  para um material inerte (Quartzo Triturado) do ponto de vista pozolânico, em termos da Resistência Mecânica à Compressão x Consumo de Material Cimentício.

Entretanto, o item 9.5 deste capítulo frisou que, para quaisquer consumos de material inerte adicionado, a resistência à compressão não supera os valores de tensão das amostras controle. Isto é, para manter mesmas propriedades mecânicas, as curvas obtidas pelo incremento no consumo de quartzo não puderam ser correlacionadas com a reta que indica o valor de resistência mecânica do traço controle, impedindo a obtenção dos valores de eficácia.

Portanto, neste item propõe-se aplicar o conceito de “Cimento Equivalente”, para avaliar o material perante o desempenho pozolânico demonstrado pela CBC. Sendo assim, os valores de  $k$  serão obtidos relacionando os consumos de água, consumo de cimento reduzido e parâmetros de ajuste  $A_1$  e  $A_2$  para cada resistência à compressão obtida, ao se incrementar “ $i$ ” consumo de Material Inerte.

### 9.7.1 Dosagem das misturas de Microconcreto

Com base na estrutura definida no item 9.3, se propôs avaliar a inclusão do Quartzo Triturado tomando como base as misturas controle com  $a/cm = 0,5$ , para então se reduzir 10% do Consumo de Cimento Portland e permitir incrementar consumos de material inerte. Para isso, o consumo de água foi mantido constante para todas as misturas ( $180 \text{ kg/m}^3$ ). A Tabela 9.26 abaixo mostra os traços selecionados.

Tabela 9.26 – Dosagens de Microconcretos com Adição de Inerte para obtenção do consumo de “Cimento Equivalente”.

Grupo	Mistura	cm/ag	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos ( $\text{kg/m}^3$ )					
						Cim.	Areia	B 0	Pó P.	Água	CBC
Controle	M-C-0,5	5,500	0,5300	0,5000	0,000	<b>360,20</b>	880,68	660,24	440,16	<b>180,10</b>	0,00
	M-36C-0 I	6,210	0,5291	0,5560	0,000	<b>324,01</b>	912,03	660,05	440,03	<b>180,15</b>	0,00
	M-72C-0 I	7,090	0,5281	0,6250	0,000	<b>288,17</b>	942,99	660,09	440,06	<b>180,11</b>	0,00
	M-108C-0 I	8,224	0,5271	0,7140	0,000	<b>252,21</b>	974,04	660,10	440,07	<b>180,08</b>	0,00
M-36C-I	M-36C-9 I	6,015	0,5293	0,5403	2,710	<b>324,14</b>	903,90	660,06	440,04	<b>180,01</b>	9,03
	M-36C-18 I	5,833	0,5293	0,5268	5,270	<b>324,04</b>	895,09	660,11	440,07	<b>180,20</b>	18,03
	M-36C-27 I	5,661	0,5295	0,5130	7,695	<b>324,03</b>	887,09	660,10	440,07	<b>180,09</b>	27,01
	M-36C-36 I	5,498	0,5297	0,5000	10,000	<b>324,00</b>	879,08	660,07	440,05	<b>180,00</b>	36,00
	M-36C-72 I	4,910	0,5301	0,4548	18,190	<b>324,11</b>	845,00	660,13	440,09	<b>180,18</b>	72,06
	M-36C-108 I	4,425	0,5307	0,4165	25,000	<b>324,13</b>	812,08	660,18	440,12	<b>180,00</b>	108,04
	M-36C-144 I	4,013	0,5312	0,3850	30,770	<b>324,07</b>	778,41	660,05	440,03	<b>180,22</b>	144,03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.7.2 Resistência Mecânica à Compressão

A partir da redução do consumo de cimento e o correspondente aumento no consumo de Inerte para diferentes classes de resistências, segue na Tabela 9.27 abaixo os resultados de resistência Mecânica à Compressão (média e desvio padrão) dos corpos de prova ao longo do tempo de cura.

Tabela 9.27 – Resistência à Compressão de Microconcretos para obtenção do consumo de “Cimento Equivalente”.

Grupo	Mistura	a/cm	Consumo CBC (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)		
				28	90	180
				Resistência à Compressão (MPa)		
Controle	M-C-0,5	0,5000	0,0	44,7 ± 3,8	57,0 ± 2,1	60,77 ± 1,1
	M-36C-0 I	0,5560	0,0	37,8 ± 2,5	47,4 ± 5,1	48,71 ± 1,7
	M-72C-0 I	0,6250	0,0	32,4 ± 5,0	39,1 ± 3,4	41,37 ± 1,3
	M-108C-0 I	0,7140	0,0	22,3 ± 1,5	36,3 ± 1,3	34,12 ± 1,7
M-36C-I	M-36C-9 I	0,5403	9,0	38,0 ± 1,7	48,4 ± 4,8	51,98 ± 3,7
	M-36C-18 I	0,5268	18,0	36,6 ± 4,5	44,0 ± 1,7	52,03 ± 2,6
	M-36C-27 I	0,5130	27,0	36,8 ± 5,5	40,8 ± 4,9	44,21 ± 1,7
	M-36C-36 I	0,5000	36,0	36,5 ± 2,5	38,8 ± 3,3	43,88 ± 4,7
	M-36C-72 I	0,4548	72,0	33,7 ± 1,6	39,6 ± 2,8	41,92 ± 1,0
	M-36C-108 I	0,4165	108,0	30,2 ± 5,3	38,9 ± 5,6	41,67 ± 6,5
	M-36C-144 I	0,3850	144,0	35,4 ± 1,1	43,5 ± 2,5	49,10 ± 2,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.7.3 Parâmetros de ajuste das curvas $R_c$ x $a/c$

Os parâmetros  $A_1$  e  $A_2$  foram obtidos a partir das misturas controle, para os diversos tempos de cura. Sendo assim, atribuiu-se diferentes consumos de cimento para traçado das curvas conforme Modelo Potencial.

Tabela 9.28 – Parâmetros de Ajuste, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Correlação para avaliação do fator  $k$  de microconcretos com CBC em termos “Cimento Equivalente”.

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$A_1$	$A_2$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
Controle	28	11,567	-1,975	0,021	0,996
	90	23,743	-1,232	0,021	0,985
	180	19,821	-1,585	0,017	0,991

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se que o modelo Potencial novamente proporcionou ótima correlação entre a Resistência Mecânica e a relação água/cimento. Valores muito altos de coeficiente de determinação foram obtidos, ao mesmo tempo em que foram constatados valores muito baixos de erro médio relativo.

### 9.7.4 Resultados do Fator $k$ de Eficácia Cimentante

Aplicando-se os valores obtidos dos Parâmetros de Ajuste  $A_1$  e  $A_2$ , é possível obter os resultados do consumo de “Cimento Equivalente” para cada uma das adições de quartzo em relação ao consumo de Cimento Portland reduzido e idade de cura. Sabendo que a expressão “Cimento Equivalente” corresponde a “ $ki$ ”, conduz-se a obtenção do fator  $k$  de eficácia cimentante conforme a Tabela 9.29 abaixo:

Tabela 9.29 – Resultados dos Valores de “Cimento Equivalente” fator  $k$  de eficácia cimentante para Microconcretos com Quartzo Triturado em termos de Resistência à Compressão e Consumo de inerte adicionado.

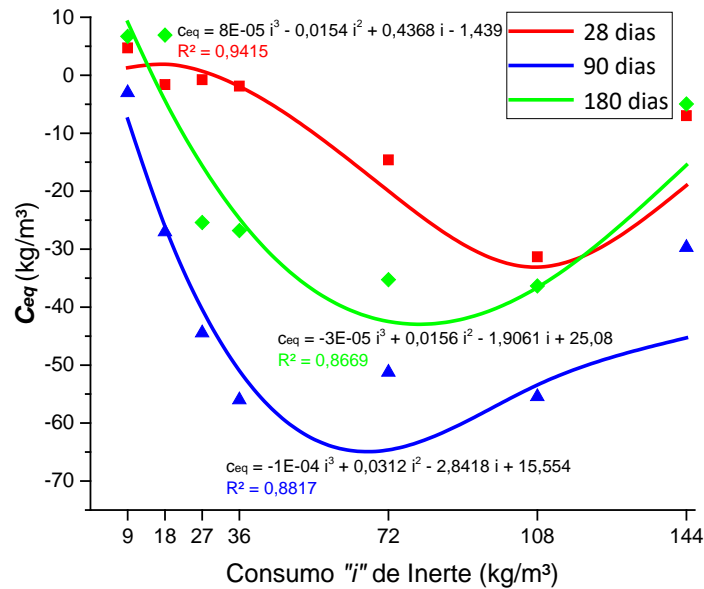
Grupo	Mistura	Consumo Inerte “ $i$ ” (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Cura (dias)					
			28		90		180	
			$c_{eq}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$	$c_{eq}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$	$c_{eq}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$
	M-36C-9 I	9	4,70	<b>0,52</b>	-3,02	<b>-0,34</b>	6,71	<b>0,75</b>
	M-36C-18 I	18	-1,62	<b>-0,09</b>	-27,01	<b>-1,50</b>	6,91	<b>0,38</b>
	M-36C-27 I	27	-0,77	<b>-0,03</b>	-44,45	<b>-1,65</b>	-25,41	<b>-0,94</b>
M-36C-I	M-36C-36 I	36	-1,89	<b>-0,05</b>	-56,00	<b>-1,56</b>	-26,81	<b>-0,74</b>
	M-36C-72 I	72	-14,60	<b>-0,20</b>	-51,24	<b>-0,71</b>	-35,26	<b>-0,49</b>
	M-36C-108 I	108	-31,31	<b>-0,29</b>	-55,44	<b>-0,51</b>	-36,35	<b>-0,34</b>
	M-36C-144 I	144	-6,98	<b>-0,05</b>	-29,70	<b>-0,21</b>	-4,97	<b>-0,03</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 9.7.5 Discussão dos resultados obtidos

Em primeiro lugar, realizou-se a comparação entre os dados de Cimento Equivalente “ $c_{eq}$ ” e o consumo “ $i$ ” de Quartzo Triturado, conforme mostra a Figura 9.29 abaixo, nas quais foi necessário utilizar uma correlação entre os dados por meio da regressão Polinomial de Ordem 3.

Figura 9.29 – Relação entre o Consumo “*i*” de Quartzo Triturado e o consumo de “Cimento Equivalente”, em termos de Resistência Mecânica à Compressão.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

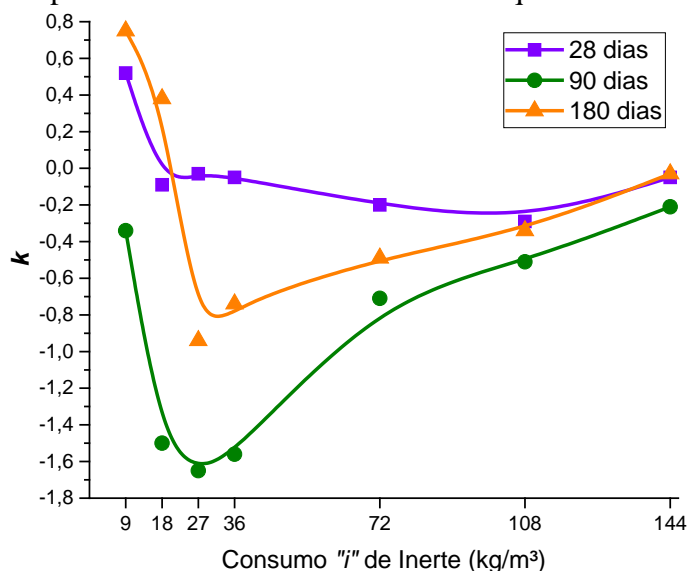
Primeiramente, é importante ressaltar que o aumento no consumo de Quartzo não está associado ao aumento da Equivalência Cimentante “ $c_{eq}$ ”. Valores negativos de  $c_{eq}$  foram obtidos, esclarecendo que o material utilizado não apresenta caráter pozolânico.

Apesar dos valores negativos, à medida em que se incrementa quartzo ultrafino, constata-se que a Equivalência Cimentante “ $c_{eq}$ ” tem um ponto mínimo, e então volta a crescer para teores elevados de material inerte.

Estes efeitos conduziram à obtenção de valores de eficácia abaixo de zero, indicando que, mesmo para consumos muito elevados de material inerte, não é possível chegar às mesmas propriedades mecânicas das misturas controle. Da mesma forma, os valores negativos de  $k$  não apresentam significado físico, e o Quartzo Triturado pode ser interpretado como uma adição inerte, que não reage com as fases hidratadas do Cimento Portland.

A Figura 9.30 abaixo traz a comparação dos valores de eficácia para o Quartzo Triturado, levando-se em conta o consumo de material adicionado e o tempo de cura das amostras.

Figura 9.30 – Resultados dos Valores de fator  $k$  em função do consumo “ $i$ ” de Material Inerte por meio do método de “Cimento Equivalente”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ao analisar os efeitos de resistência mecânica à compressão de microconcretos constituídos de quartzo triturado, as misturas com 9 kg/m<sup>3</sup> e 18 kg/m<sup>3</sup> de quartzo tiveram suas resistências melhor pronunciadas ao longo do tempo. E da mesma forma, os dados positivos de fator  $k$  evidenciam que estes teores de inerte podem indicar um efeito físico mais expressivo em relação às demais substituições, podendo obter valores semelhantes de  $k$  em relação às misturas com CBC.

Cyr, Lawrence e Ringot (2006) mencionam que, para tempos de hidratação curtos, a natureza da adição mineral não é um parâmetro significativo, uma vez que argamassas contendo as mesmas quantidades de quartzo triturado, fíler calcário e cinzas volantes de finuras equivalentes apresentam resistências mecânicas semelhantes. Ao mesmo tempo, considerando que a densidade da adição mineral inerte e não inerte seja semelhante, verifica-se então a presença mais efetiva dos efeitos de nucleação heterogênea.

Isso mostra que as adições minerais quimicamente inertes também podem modificar a cinética de hidratação do cimento, especialmente a curtas idades (LAWRENCE, CYR e RINGOT, 2003). Dos três efeitos físicos que são observados quando adições minerais são utilizadas em materiais cimentícios, verifica-se que existe uma probabilidade maior dos efeitos de distribuição de partículas e nucleação heterogênea governarem as reações com quartzo triturado. De fato, os efeitos de diluição estão associados aos incrementos na relação água/cimento, entretanto nesta metodologia os consumos de água e Cimento Portland permaneceram constantes.

Enquanto que a CBC proporciona um incremento mais efetivo da eficácia ao longo do tempo de cura, particularmente aos 90 dias, este material mostra o comportamento inverso, nas quais sua reatividade é ainda menor a longas idades. Pelo fato das reduções nos valores de  $k$  serem menores aos 28 dias de cura, pode-se observar que o efeito físico proporcionado pelo material inerte é mais pronunciado a curtas idades.

O mesmo efeito foi observado por Lollini, Redaelli e Bertolini (2014), na produção de concretos constituídos de fíler calcário, nas quais obtiveram valores de eficácia cimentante igual a 0,63, 0,35 e 0,13 a 1, 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Após esta idade, os valores de  $k$  tenderam a zero, não exercendo contribuição para as resistências mecânicas.

## 9.8 CONCLUSÕES

O modelo proposto nesta Parte do trabalho vem conduzir às seguintes conclusões:

- Mantendo-se constantes os consumos de cimento Portland e água, o aumento no consumo de CBC sempre proporciona incrementos nos valores de resistência mecânica à compressão, mostrando seu caráter reativo. Por outro lado, a inserção de quartzo triturado como material inerte levou à redução dos valores de resistência mecânica.
- Fixando-se as relações água/cimento em 0,3, 0,5 e 0,65, foram obtidos valores de  $k$  maiores que 1, nas quais se pode substituir cimento por um consumo menor de pozolana para alcançar uma mesma resistência, mantendo-se a relação a/c.
- De modo geral, o modelo proposto nesta Parte levou à obtenção de coeficientes de eficácia cimentante da CBC superiores aos valores obtidos na Parte 4 deste trabalho. Neste quesito, a porcentagem de substituição de cimento Portland por CBC para as condições de cálculo desta Parte 5 esteve compreendida entre 3% e 16%.
- A partir do conceito de “Cimento Equivalente”, chegou-se à conclusão de que um aumento no consumo de CBC significa num aumento da equivalência cimentante “ $c_{eq}$ ”, o que evidencia a contribuição da CBC na formação dos produtos de hidratação. Além disso, o modelo proposto mostra que existe um teor ótimo de CBC adicionada, nas quais o fator de eficácia é máximo e que pode estar compreendido entre 7% e 18% de substituição em massa de cimento Portland por pozolana.
- Por outro lado, a adição de quartzo triturado como material inerte conduziu à obtenção de valores de eficácia abaixo de zero, indicando que os valores negativos de  $k$  não apresentam significado físico.



## Parte 6

### *O Coeficiente $k$ de Eficácia Cimentante da CBC por meio da produção de Concretos e em termos de Resistência Mecânica à Compressão x Relação Água/Cimento*

A sexta parte deste trabalho vem propor mais uma forma de obtenção do fator  $k$  de eficácia cimentante da Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar, comprovando os efeitos deste material pozzolânico para a produção de concretos equivalentes. Para isso, atribui-se como metodologia de cálculo as propriedades mecânicas das amostras, em particular os valores de resistências mecânicas à compressão.

#### **10.1 DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETOS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO.**

##### **10.1.1 Nomenclatura e Métodos de Dosagem para produção dos Concretos**

O estudo inicial partiu da definição das misturas de concreto sem e com inserção de CBC, aplicando-se os mesmos procedimentos descritos na metodologia de dosagem de microconcretos. Sendo assim, para cada porcentagem de substituição de pozolana, foram selecionadas dosagens com relações a/cm baixo (0,3), a/cm médios (0,45) e a/cm alto (0,65), partindo do mesmo princípio utilizado pelos métodos de dosagem “IPT/EPUSP Helene & Terzian” e “Concreto de Elevado Desempenho – Vitervo O’Reilly Díaz”. Nestas condições, se considerou a produção de misturas com diferentes proporções entre aglomerantes e agregados secos, em massa, evidenciadas pelos traços ricos (1:3,5), médios (1:5,0) e pobres (1:6,5).

Apesar do método IPT/EPUSP Helene & Terzian propor relações água/cimento compreendidas entre 0,35 e 0,70, a utilização de aditivos superplastificantes permitiu reduzir estes valores, satisfazendo ao mesmo tempo as recomendações sugeridas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), que define a relação água/cimento máxima de 0,65 para estruturas de concreto armado submetidas à classe de agressividade I.

Sendo assim, serão avaliados os resultados de resistência mecânica à compressão axial de corpos de prova de concreto cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm, atribuindo-se:

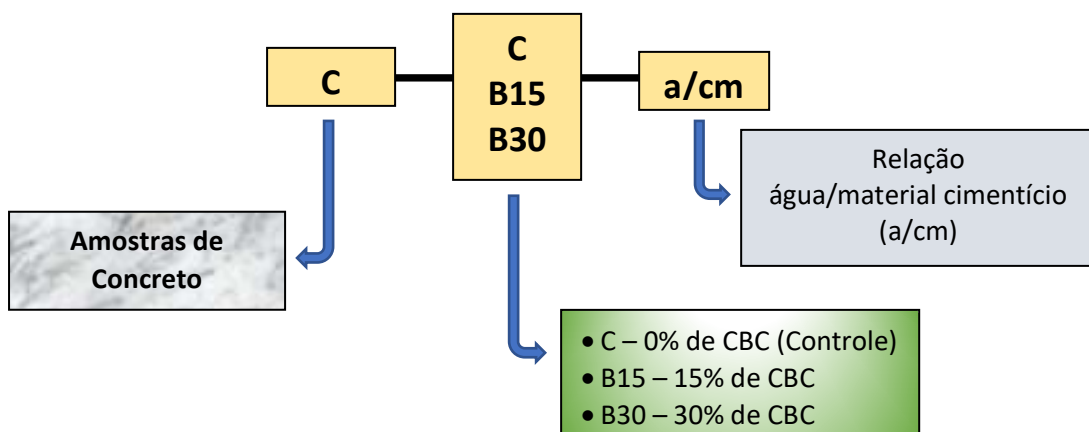
- Materiais utilizados: Aglomerante (Cimento Portland CP V-ARI), Agregado Miúdo (Areia Média Natural), Agregado Graúdo (Brita 0,5), Água, Pozolana (CBC) e Aditivo Superplastificante para manter a trabalhabilidade;
- Relações material cimentício/agregados: 3,5, 5,0 e 7,0;
- Relações água/material cimentante: 0,3, 0,45 e 0,65;
- Microconcreto Controle (sem substituição de CBC);
- Microconcreto com substituição em massa de Cimento Portland por 15% e 30% de CBC;
- Tempos de Cura de 7, 28 e 90 dias.

Os procedimentos para mistura, adensamento, moldagem, cura e ensaios de ruptura dos corpos de prova de Concreto foram seguidos conforme os parâmetros definidos nos itens 4.2.8.1 a 4.2.8.4 da parte experimental.

Além disso, a evolução da resistência à compressão axial será avaliada em termos de relação água/material cimentício ( $a/cm$ ), através da soma de cimento Portland + CBC.

A nomenclatura utilizada para designar as misturas se apresenta de forma:

Figura 10.1 - Nomenclatura utilizada para designar as misturas de concreto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As dosagens dos Microconcretos estão definidas nas Tabelas 10.1 a 10.3 abaixo.

Tabela 10.1 – Dosagens de Concretos para Misturas sem adição de CBC (Controle).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )				
					Cimento	Areia	B 0,5	Água	CBC
C – C – 0,30	3,5	0,51	0,30	0,0	519,33	672,53	1145,12	155,80	0,00
C – C – 0,45	5,0	0,51	0,45	0,0	379,38	781,52	1115,37	170,72	0,00
C – C – 0,65	7,0	0,51	0,65	0,0	279,10	859,62	1094,06	181,41	0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10.2 – Dosagens de Concretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B15).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )				
					Cimento	Areia	B 0,5	Água	CBC
C – B15 – 0,30	3,5	0,51	0,30	15,0	440,59	671,25	1142,93	155,50	77,75
C – B15 – 0,45	5,0	0,51	0,45	15,0	322,02	780,43	1113,81	170,48	56,83
C – B15 – 0,65	7,0	0,51	0,65	15,0	236,99	858,73	1092,93	181,23	41,82

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10.3 – Dosagens de Concretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B30).

Mistura	ag/cm	$\alpha$	a/cm	% CBC	Consumos (kg/m <sup>3</sup> )				
					Cimento	Areia	B 0,5	Água	CBC
C – B30 – 0,30	3,5	0,51	0,30	30,0	362,14	669,96	1140,75	155,20	155,20
C – B30 – 0,45	5,0	0,51	0,45	30,0	264,82	779,34	1112,26	170,24	113,50
C – B30 – 0,65	7,0	0,51	0,65	30,0	194,97	857,85	1091,81	181,04	83,56

Fonte: Elaboração do próprio autor.

É notório que o aumento da relação agregado/cimento e redução do fator a/cm proporciona reduções nos consumos de Cimento Portland. Ao mesmo tempo, sabendo que o método proposto conduz à constância do teor de argamassa seca ( $\alpha$ ), observa-se que esta propriedade é alcançada por meio de aumentos nos consumos de areia e reduções nos consumos de brita.

### 10.1.2 Trabalhabilidade

Após o procedimento de mistura dos concretos, adotou-se o ensaio do tronco de cone convencional (Slump Test) para medir a consistência dos concretos. A porcentagem de aditivo superplastificante requerida para as misturas foi encontrada para garantir um abatimento de  $80,0 \pm 10,0$  mm.

Nestas condições, a Tabela 10.4 fornece os dados de consistência para os traços estudados.

Tabela 10.4 – Trabalhabilidade de Concretos para Misturas com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland.

(a) Traço Controle, com 0% de CBC em relação à massa de cimento Portland (C – C)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Abatimento (mm)
C – C – 0,30	0,30	0,76	87,0
C – C – 0,45	0,45	0,21	80,0
C – C – 0,65	0,65	0,15	73,0

(b) Traço com 15% de CBC em relação à massa de cimento Portland (C – B15)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Abatimento (mm)
C – B15 – 0,30	0,30	1,12	90,0
C – B15 – 0,45	0,45	0,50	83,0
C – B15 – 0,65	0,65	0,34	73,0

(c) Traço com 30% de CBC em relação à massa de cimento Portland (C – B30)

Mistura	a/cm	% Superpl.	Abatimento (cm)
C – B30 – 0,30	0,30	1,25	75,0
C – B30 – 0,45	0,45	0,64	78,0
C – B30 – 0,65	0,65	0,40	89,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com os dados acima, pode-se observar que os concretos elaborados sem e com adição de CBC apresentaram consistência próxima, embora se tenha utilizado diferentes relações a/cm para os traços ricos, médios e pobres. Tal comportamento foi obtido pela inclusão do aditivo superplastificante, que exerce influência direta na fluidez das misturas.

Assim como observado nas misturas de microconcreto, os resultados evidenciam que a relação a/cm tem forte influência na porcentagem de substituição de aditivo. Independente da porcentagem de cimento Portland substituída por CBC, as misturas revelam um incremento na porcentagem de aditivo à medida em que se reduz as relações a/cm.

Também se verifica que as misturas de concretos com relação a/cm alta tendem a apresentar menores valores de abatimento, caracterizados pelo incremento no consumo de agregados juntamente com a redução no consumo de cimento Portland. Entretanto, para a mistura com C – B30 – 0,65, que apresenta um maior teor de material pozolânico, este fenômeno é menos expressivo.

Para as misturas C – B30, fica evidente que, mesmo utilizando um maior teor de aditivo superplastificante, os traços ricos e médios apresentaram menores valores de abatimento, caracterizando mais uma vez o caráter fino da CBC, nas quais requer um maior consumo de água para manter a trabalhabilidade constante.

Também analisou-se a correlação entre a porcentagem de aditivo superplastificante e a relação água/material cimentício, utilizando novamente o Modelo de Regressão Polinomial (Ordem 2) conforme mostra a Equação 10.1, para a obtenção dos parâmetros de ajuste A, B e C das curvas teóricas (Tabela 10.5).

$$\% \text{ Superp.} = (A * a/cm^2) + (B * a/cm) + C \quad (10.1)$$

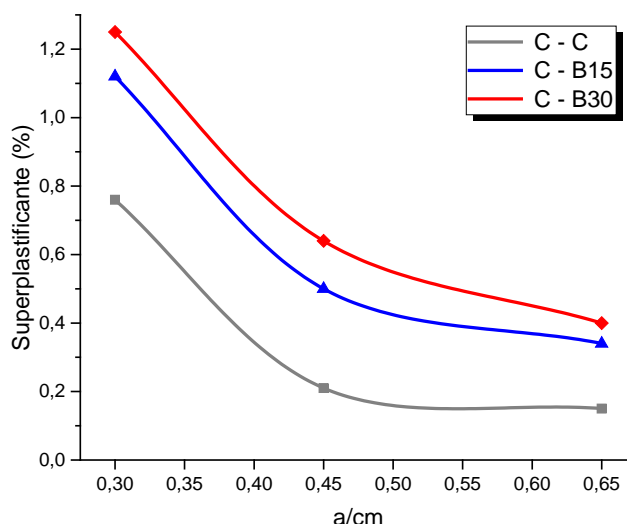
Tabela 10.5 – Parâmetros de ajustes polinomiais da trabalhabilidade de Concretos em função da porcentagem de Superplastificante e relação a/cm.

Mistura	A	B	C	R <sup>2</sup>
C – C	9,619	-10,881	3,159	1,000
C – B15	9,524	-11,276	3,646	1,000
C – B30	8,191	-10,210	3,576	1,000

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por se tratar de apenas três misturas para cada porcentagem de CBC substituída, as linhas de tendência utilizadas se ajustaram perfeitamente aos dados experimentais, apresentando valores de R<sup>2</sup> = 1. A Figura 10.2 representa a correlação entre os parâmetros que justificam a trabalhabilidade similar das misturas.

Figura 10.2 – Trabalhabilidade de Microconcretos constituídos de CBC – Influência da porcentagem de aditivo Superplastificante em função da relação a/cm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De maneira geral, as curvas obtidas revelam um padrão de crescimento do teor de aditivo bastante similar quanto à redução no fator  $a/cm$  e inclusão de CBC nas misturas. Comparando-se as misturas C – C e C – B15, o incremento no teor de superplastificante para a mistura constituída de CBC parece ser praticamente constante, independente da relação  $a/cm$ . O mesmo fato é observado entre as misturas C – B15 e C – B30.

Diferentemente do observado nas misturas de microconcreto, as dosagens C – B15 e C – B30 apresentaram teores de aditivo mais próximos entre si, distanciando das porcentagens de aditivo obtidas para as misturas controle. Além disso, os traços médios e pobres constituídos de CBC requereram porcentagens em até 3 vezes mais do que os teores obtidos para a mistura controle.

Os métodos de dosagem utilizados explicam a correlação entre as resistências à compressão do concreto e a compacidade dele quando fresco. Para isso, por meio do ensaio de massa unitária compactada, o teor de argamassa ideal de 51% garantiu com que a argamassa pudesse envolver adequadamente o agregado graúdo (Figura 10.3). Para todos os traços de concreto, a trabalhabilidade do mesmo também se mostrou adequada, sem a presença de exsudação e segregação nas misturas.

Figura 10.3 – Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (*Slump Test*) aplicado às misturas de Concretos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 10.1.3 Resistência Mecânica à Compressão Axial

A avaliação das propriedades mecânicas de concretos se deu por meio dos ensaios de resistência à compressão, aplicados às misturas Controle (C – C), com 15% de CBC (C – B15) e 30% de CBC (C – B30). Sendo assim, as Tabelas 10.6 a 10.8 mostram o comportamento dos concretos frente à esta propriedade, em função do tempo de cura, relação  $a/cm$  e porcentagem de substituição de Cimento Portland por CBC.

Tabela 10.6 – Resistência à Compressão Axial de Concretos para Misturas sem adição de CBC (Controle).

Mistura	Agreg./cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
			7	28	90
<b>Resistência à Compressão Axial (MPa)</b>					
C – C – 0,30	3,5	0,30	67,4 ± 1,1	74,2 ± 5,0	89,9 ± 4,7
C – C – 0,45	5,0	0,45	35,4 ± 1,2	45,3 ± 2,4	53,9 ± 1,7
C – C – 0,65	7,0	0,65	23,8 ± 0,9	25,9 ± 1,5	34,4 ± 1,4

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10.7 – Resistência à Compressão de Concretos para Misturas com adição de 15% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B15).

Mistura	Agreg./cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
			7	28	90
<b>Resistência à Compressão Axial (MPa)</b>					
C – B15 – 0,30	3,5	0,30	55,4 ± 1,2	70,6 ± 3,6	88,4 ± 2,3
C – B15 – 0,45	5,0	0,45	33,8 ± 0,6	44,8 ± 1,2	51,8 ± 1,8
C – B15 – 0,65	7,0	0,65	22,9 ± 1,0	29,8 ± 1,4	30,6 ± 1,2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10.8 – Resistência à Compressão de Concretos para Misturas com adição de 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland (C – B30).

Mistura	Agreg./cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
			7	28	90
<b>Resistência à Compressão Axial (MPa)</b>					
C – B30 – 0,30	3,5	0,30	59,2 ± 4,6	73,8 ± 2,2	88,3 ± 1,6
C – B30 – 0,45	5,0	0,45	34,5 ± 3,0	52,0 ± 1,1	54,3 ± 1,3
C – B30 – 0,65	7,0	0,65	18,4 ± 1,0	22,7 ± 0,9	25,9 ± 0,5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Primeiramente, verifica-se a importância de se inferir que, tanto para as misturas controle quanto para as constituídas de CBC, os valores de resistência à compressão se comportam de maneira bastante habitual, nas quais caracteriza um aumento gradual das resistências à medida em que se aumenta o tempo de cura e reduz a relação a/cm.

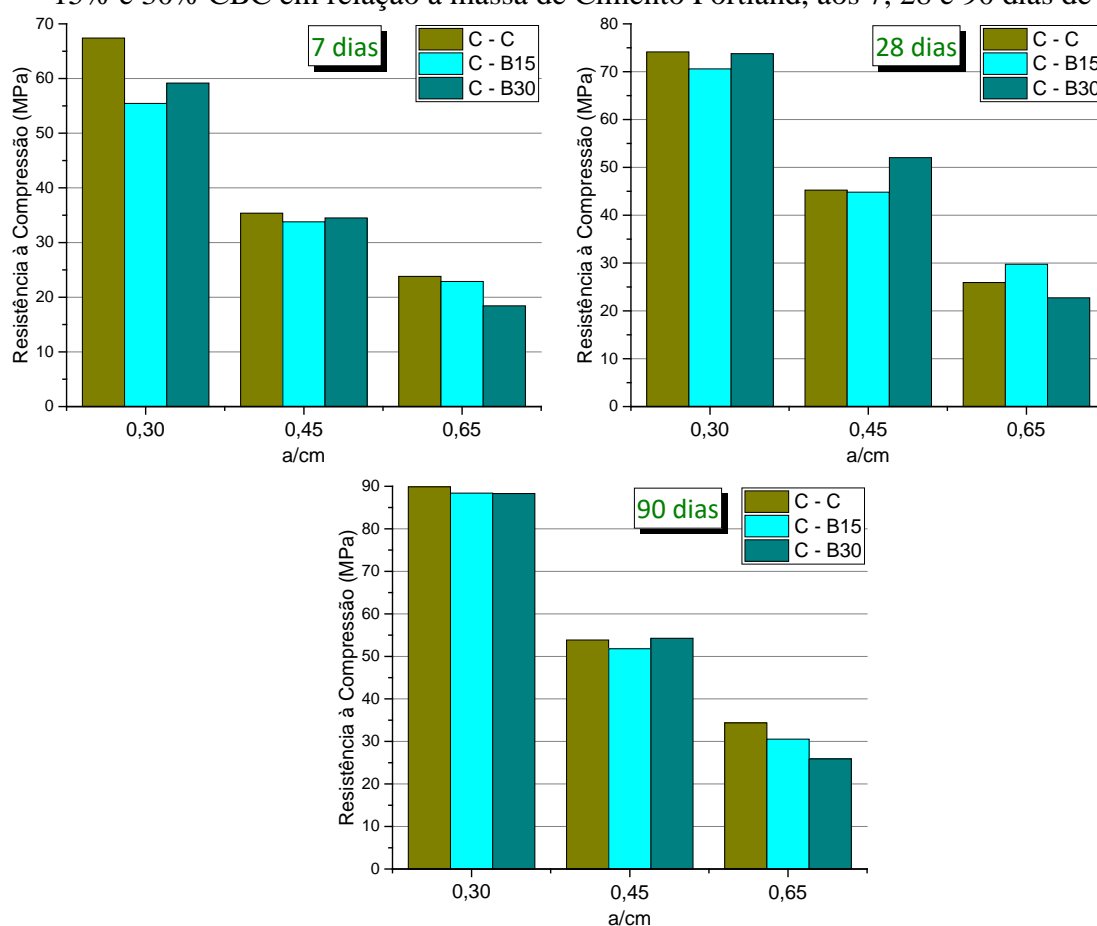
Além disso, os resultados mostram que, com a inclusão de CBC, se permite a obtenção de concretos de diversas classes de resistência, entre 20 MPa e 75 MPa aos 28 dias de cura, evidenciando a produção desde concretos convencionais até concretos de alto desempenho. De fato, podem se registrar valores expressivos de resistência para concretos com 30% de substituição de cimento Portland por CBC, da ordem de 90 MPa aos 90 dias de cura, e que refletem a similaridade dos resultados entre as misturas controle.

De maneira geral, a incorporação de CBC nas misturas de concreto leva à redução dos valores de resistência à compressão axial a curtas idades e para misturas com a/cm altos;

entretanto a discrepância entre os resultados pode ser mínima dependendo do tempo de cura das amostras, relação a/cm e teor de CBC.

O comportamento mecânico das amostras de concreto também será avaliado por meio das Figuras 10.4 abaixo, que mostra a evolução das resistências frente aos diferentes teores de substituição de CBC e relações a/cm.

Figura 10.4 – Evolução da Resistência à Compressão Axial de Concretos com adição de 0%, 15% e 30% CBC em relação à massa de Cimento Portland, aos 7, 28 e 90 dias de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Aos 7 dias de cura, pode-se inferir que a resistência mecânica de concretos constituídos de CBC são, de maneira geral, ligeiramente inferiores aos concretos controle. Novamente este fato pode ser pronunciado em função da baixa reatividade do material pozolânico a curtas idades, associado aos efeitos de redução no consumo de Cimento Portland.

Entretanto, este comportamento parece ser alterado aos 28 dias de cura, nas quais as misturas com CBC evidenciam resistências mecânicas superiores à idade inicial. Além disso, foram constatados os incrementos mais efetivos de resistência mecânica para as amostras com substituição de Cimento Portland por CBC em relação às amostras controle, levando à



conclusão de que as reações da CBC com o hidróxido cálcico liberado durante a hidratação do cimento podem ser mais efetivas a partir desta idade de cura.

A longa idade de cura, os gráficos continuam evidenciando a similaridade de resistências mecânicas entre as misturas sem e com adição de pozolana, indicando o avanço das reações pozolânicas. Além disso, o incremento de resistência é mais efetivo para relações a/cm médios e baixos, indicando que as reações pozolânicas com CBC podem ser melhor pronunciadas quando o consumo de água das misturas é menor e sua estrutura se apresenta de forma mais densa, menos porosa.

Diferentemente da análise feita para a substituição de cimento Portland por CBC em microconcretos, vale ressaltar que a inserção de 30% de CBC em concretos tem proporcionado resistências mecânicas significativas em relação às misturas controle. Neste sentido, este comportamento é mais evidente para as misturas com relação a/cm baixas e médias, considerando que incrementos de até 15% foram observados para a mistura C – B30 – 0,45.

Por outro lado, a inclusão de 15% de CBC em relação à massa de cimento Portland também têm proporcionado as melhores propriedades mecânicas ao longo do tempo, assim como avaliado para as misturas de microconcretos.

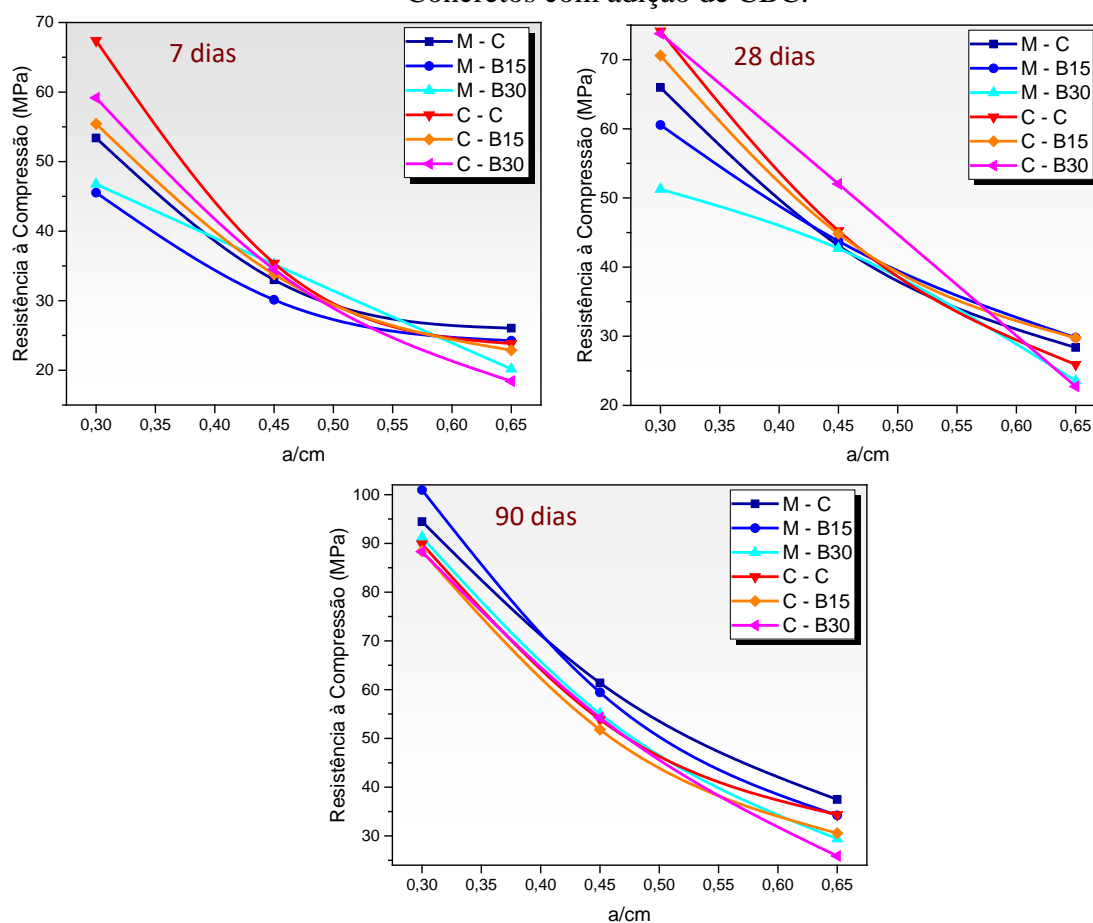
Para as idades iniciais, este teor de CBC parece ter demonstrado uma equivalência melhor da resistência em relação ao controle considerando-se as relações a/cm baixas e médias, sendo um indicativo da influência dos efeitos de nucleação aos 7 dias de cura. Para relações a/cm altas, as reduções mais expressivas da resistência quando se adiciona 30% de CBC pode ter sido governada pelos efeitos de diluição, condicionadas ao alto consumo de água e baixos consumo de cimentos.

As quedas nas propriedades mecânicas foram mais expressivas para as misturas com 30% de substituição de cimento por CBC e relação a/cm = 0,65; de fato, reduções de até 25 % foram observadas para as misturas C – B30 – 0,65, aos 90 dias de cura.

O comportamento geral das propriedades mecânicas evidencia que a CBC apresenta boa reatividade, visto que, com 7 dias de cura, as misturas com CBC apresentam resistências compatíveis ao controle. Entretanto, fica evidente que a obtenção das melhores propriedades não está intrinsecamente relacionada com a inclusão do material pozolânico, e sim com seu teor de substituição, relação água/material cimentício e tempo de cura.

Com os dados obtidos, se permite fazer uma comparação entre as propriedades mecânicas de resistência à compressão de microconcretos e concretos constituídos de CBC. Dessa forma, a figura 10.5 abaixo indica o comportamento de misturas submetidas ao mesmo tempo de cura, relação a/cm e teor de adição mineral.

Figura 10.5 – Comparação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos e Concretos com adição de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A avaliação das diferentes misturas revela que a inserção de CBC em concretos e microconcretos tem proporcionado o mesmo comportamento frente às variações nas relações  $a/cm$ . Percebe-se um comportamento bastante habitual entre as resistências mecânicas de concretos e microconcretos sem e com adição de CBC, principalmente para relações  $a/cm$  médias e altas.

Em relação ao tempo de cura, as misturas de microconcreto revelaram um ganho menos expressivo de resistência mecânica a curtas idades (7 e 28 dias), em relação às misturas de concreto. Entretanto, este comportamento não passa a ser evidente aos 90 dias de cura, pressupondo que a adição de CBC em misturas de microconcreto levam às reações de hidratação mais tardias.

A maior disparidade entre os resultados mecânicos se deu aos 7 e 28 dias de cura, em particular aos traços ricos. Se percebe que as misturas de concreto superaram em grande amplitude as resistências das misturas de microconcreto, e este efeito é ainda mais pronunciado quando se incrementa altas porcentagens de CBC. Se observa, por exemplo, uma redução de

30% da resistência da mistura de microconcreto M – B30 – 0,3, em relação à mistura de concreto C – B30 – 0,3, aos 28 dias de cura.

No entanto, aos 90 dias de cura, as discrepâncias são bem menos pronunciadas, levando à conclusão de que a CBC proporciona elevadas resistências mecânicas em relação às misturas controle. Mais uma vez, a Figura 10.5 deixa evidente que o teor ótimo de CBC em relação à massa de cimento Portland é de 15%, pois têm seus efeitos superados, independentemente da relação a/cm.

Em função da composição granulométrica mais contínua para as misturas de microconcreto, pode-se denotar que este efeito foi mais conclusivo na obtenção das melhores propriedades mecânicas para traços pobres, onde o efeito de empacotamento parece superar a redução expressiva no consumo de Cimento Portland.

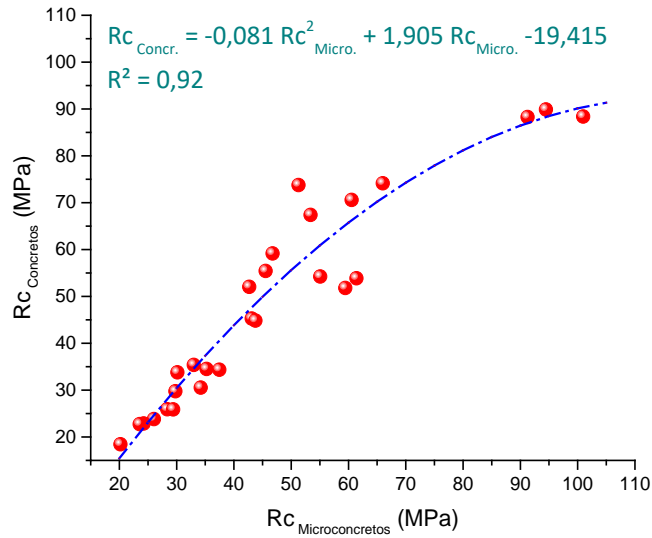
Por outro lado, Metha e Monteiro (2008) mencionam que o tamanho dos poros na zona de transição da interface pasta de cimento – agregados em concretos é maior que em argamassas, mesmo para misturas com relações a/c baixas, o que leva à redução dos valores de resistência mecânicas. Nesta região, ainda se forma uma película ao redor dos agregados, nas quais a relação água/cimento local pode ser mais alta, o que pode conduzir a uma região mais porosa do que a pasta presente na matriz de cimento. Neste sentido, este efeito pode ser notado nas misturas de microconcretos aos 7 e 28 dias de cura, com uma taxa maior de regiões de transição entre os grãos de areia, pó de pedra e brita 0; por outro lado, a composição granulométrica mais uniforme foi acondicionada às misturas de concreto, o que denotou melhorias nas propriedades mecânicas de traços ricos ao se trabalhar com areia e brita 0,5 nas idades iniciais de cura.

Da mesma forma, pode-se perceber que aos 90 dias a água aprisionada nos interstícios da zona de transição de microconcretos, mesmo com a/cm baixos, promoveram o desenvolvimento das reações pozolânicas mais tardias, associadas à portlandita disponível para as reações com o aumento no consumo de cimento Portland.

De maneira geral, os resultados obtidos evidenciam as boas condições de ensaios, entretanto é importante levar em consideração as alterações nos diversos parâmetros ao se produzir concreto em relação às misturas de microconcretos; destacam-se as alterações na granulometria dos agregados graúdos, no consumo de areia para satisfazer o teor de argamassa seca ideal, além de mudanças no teor de aditivo superplastificante, que deve garantir a trabalhabilidade das misturas mesmo utilizando métodos distintos para medir a consistência.

A Figura 10.6 abaixo mostra a correlação entre os valores, mostrando boa confiabilidade na reprodução das misturas. Por meio do modelo de ajuste polinomial dos dados experimentais, obteve-se um fator de correlação igual a 0,938 e coeficiente de determinação igual a 0,92.

Figura 10.6 – Correlação dos dados de Resistência à Compressão de Microconcretos e Concretos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 10.1.4 Coeficiente entre Resistências à Compressão de Concretos

Outra forma de avaliar a evolução das resistências mecânicas é por meio do coeficiente entre as resistências das misturas sem e com adição de CBC, da mesma forma que denominado como “Índice de Atividade Resistente (IAR)” para as misturas de argamassas. As Tabelas 10.9 e 10.10 abaixo indicam os valores de coeficiente obtidos para cada porcentagem de CBC.

Tabela 10.9 - Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Concretos Controle e com 15% de CBC.

Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
		7	28	90
		Rc <sub>poz.</sub> / Rc <sub>contr.</sub>		
C – B15 – 0,30	0,30	0,82	0,95	0,98
C – B15 – 0,45	0,45	0,96	0,99	0,96
C – B15 – 0,65	0,65	0,96	1,15	0,89

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10.10 - Coeficiente entre Resistências à Compressão de Misturas de Concretos Controle e com 30% de CBC.

Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
		7	28	90
		<b>RC<sub>poz.</sub> / RC<sub>contr.</sub></b>		
C – B30 – 0,30	0,30	0,88	0,99	0,98
C – B30 – 0,45	0,45	0,98	1,15	1,01
C – B30 – 0,65	0,65	0,77	0,88	0,75

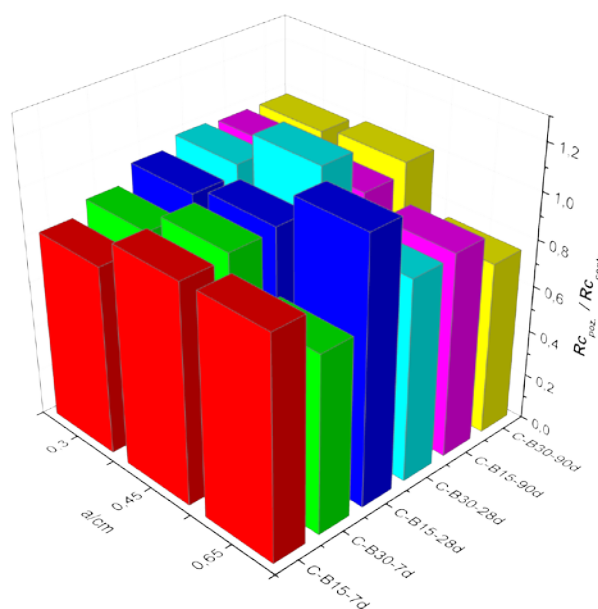
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Fazendo uma analogia entre as misturas de argamassa e concretos, a norma ASTM C-618 (2015) define um valor mínimo de IAR de 0,75 para classificar o material em estudo como pozolana de classe F, aos 7 e 28 dias de cura. Se estas condições fossem válidas para misturas de concreto, observa-se que todas as dosagens estudadas satisfariam os requerimentos da norma.

Para estas misturas, percebe-se que o desenvolvimento da resistência é mais influenciado pelo efeito físico nas idades iniciais, ao mesmo tempo em que o efeito pozolânico não é tão influente a ponto de proporcionar elevadas resistências a longas idades.

A Figura 10.7 abaixo mostra o efeito comparativo dos coeficientes  $RC_{poz.} / RC_{contr.}$  obtidos, para os diversos tempos de cura, relações a/cm e teores de CBC nas misturas de concreto.

Figura 10.7 – Influência do tempo de cura, relação a/cm e % de CBC nos Coeficientes  $RC_{poz.} / RC_{contr.}$  de Concretos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A maioria das misturas de concreto com adição de CBC revelam a similaridade de resistências mecânicas à compressão em relação às misturas controle, com valores de coeficientes bem próximos a 1. Este comportamento é mais condicionado às misturas com relação água/material cimentício igual a 0,3 e 0,45.

Além disso, as misturas com 15% de CBC para estas relações a/cm sugerem um comportamento mais coerente na evolução dos coeficientes, caracterizadas pelo crescimento gradual até 90 dias de cura. Por outro lado, para longas idades, se observa que os traços pobres evidenciam menores valores de coeficiente. Neste quesito, pode-se inferir que a substituição de 15% de CBC em relação à massa de Cimento Portland é mais viável do ponto de vista pozolânico, caracterizando reações mais completas ao longo do tempo e contribuindo para o ganho mais efetivo nas propriedades mecânicas de concretos.

### 10.1.5 Ganho de Resistência para Concretos com CBC

A efetividade do uso da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar ainda pode ser justificada por meio da porcentagem do ganho de resistência (SG%), levando-se conta a proporção de cimento Portland nas misturas e as resistências mecânicas de concretos sem e com adição de pozolana.

Nestas condições, as Tabelas 10.11 e 10.12 indicam os valores em porcentagem do Ganho de Resistência (SG%) em função do tempo de cura para cada teor de substituição de CBC.

Tabela 10.11 – Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Concretos com 15% de CBC.

Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
		7	28	90
SG (%)				
C – B15 – 0,30	0,30	-3,23	12,00	15,71
C – B15 – 0,45	0,45	12,39	16,53	13,13
C – B15 – 0,65	0,65	13,00	35,08	4,63

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10.12 – Porcentagem do Ganho de Resistência (SG) de Misturas de Concretos com 30% de CBC.

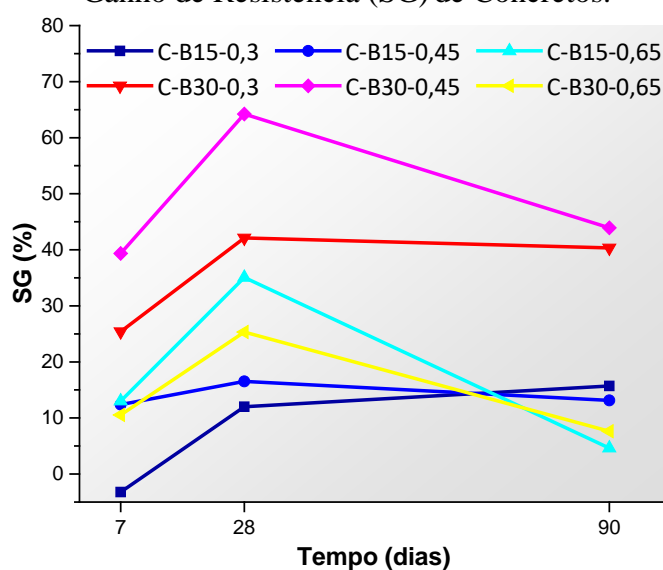
Mistura	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
		7	28	90
		<b>SG (%)</b>		
C – B30 – 0,30	0,30	25,41	42,13	40,33
C – B30 – 0,45	0,45	39,34	64,23	43,92
C – B30 – 0,65	0,65	10,53	25,33	7,63

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De maneira geral, se percebe que a CBC apresenta porcentagens de ganho de resistência positivas para todas as idades de cura e relação a/cm, demonstrando mais uma vez o caráter pozolânico da CBC. Além disso, sua atividade pozolânica está pronunciada desde as primeiras fases de hidratação do Cimento Portland, visto que porcentagens de ganho de resistência de 10% a 40% foram constatadas aos 7 dias de cura.

Da mesma forma que observado nas misturas de microconcreto, as proximidades entre as resistências de concretos com 15% e 30% de CBC, aliado à maior redução da porcentagem de cimento Portland da mistura com 30% de CBC, proporcionaram a obtenção de maiores ganhos de resistências para estas misturas. Ganhos de resistência de até 65% foram obtidas para a mistura C – B30 – 0,45, aos 28 dias de cura.

Figura 10.8 – Influência do tempo de cura, relação a/cm e % de CBC na Porcentagem de Ganho de Resistência (SG) de Concretos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 10.8 mostra que as porcentagens de ganho de resistência para concretos constituídos de CBC estão compreendidos entre 10% e 65%, e os melhores resultados foram obtidos para a idade de cura de 28 dias. Além disso, verifica-se a estabilização de SG(%) para as misturas com relação a/cm baixas e médias dos 28 para os 90 dias de cura; mais uma vez este comportamento evidencia a reatividade tardia da CBC, demonstrando que maiores consumos de cimento podem proporcionar o aumento de portlandita disponível para as reações com a CBC e formação dos produtos de hidratação.

Novamente, os efeitos de diluição parecem estar condicionados às misturas com relação a/cm altas (0,65) às curtas idades, aliados ao baixo consumo de cimento e baixos valores de porcentagem de ganho.

Apenas a mistura C – B15 – 0,3 apresenta SG(%) menor que 0 aos 7 dias de cura, entretanto este caso isolado não faz caracterizar a Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar como material inerte, visto que porcentagens mais significativas foram obtidas para a mesma mistura a tempos de cura maiores.

## **10.2 CÁLCULO DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE PARA CONCRETOS COM ADIÇÃO DE CBC**

Os procedimentos de cálculo para determinação do fator  $k$  de eficácia cimentante de concretos com adição de CBC serão os mesmos empregados nas misturas de microconcretos, definidos na Parte 4 dos resultados e discussões.

Os valores de fator  $k$  serão avaliados conforme os parâmetros definidos para a produção dos concretos, considerando diferentes relações água/ material cimentante (0,3, 0,45 e 0,65), inserção de 0%, 15% e 30% de CBC em relação à massa de cimento Portland e tempos de cura de 7, 28 e 90 dias.

Considerando que a presença de pozolana realiza um papel equivalente à redução da relação água/cimento, as curvas de resistência à compressão serão plotadas em termos de relação água/cimento e não água/material cimentante.

### **10.2.1 Modelos de ajuste das curvas $R_c$ x $a/c$**

Para as curvas de Resistência Mecânica x  $a/c$ , o método mais coerente para ajustar os dados experimentais de microconcretos constituídos de CBC foi o modelo Potencial. Sendo assim, este é caracterizado pela Equação 10.2.



$$R_c = R_o * \left(\frac{a}{c}\right)^h \quad (10.2)$$

Onde  $R_o$  e  $h$  são parâmetros de ajuste da equação.

A Tabela 10.13 abaixo mostra os parâmetros de ajuste do modelo proposto ao longo do tempo, bem como o erro relativo médio e o coeficiente de determinação ,para as misturas controle, com 15% e 30% de CBC em relação à massa de Cimento Portland.

Tabela 10.13 – Parâmetros de Ajuste Potencial, Erro Relativo Médio e Coeficiente de Determinação para avaliação do fator  $k$  de Concretos com CBC em termos de Resistência Mecânica à Compressão e Relação  $a/c$ .

Mistura	Tempo de Cura (dias)	$R_o$	$h$	$e_{rm}(\%)$	$R^2$
C - C	7	12,87	-1,35	4,45	0,988
C - B15		16,65	-1,15	1,37	0,998
C - B30		16,91	-1,51	3,21	0,995
C - C	28	14,74	-1,36	2,54	0,996
C - B15		22,05	-1,12	0,05	1,000
C - B30		22,33	-1,51	11,68	0,935
C - C	90	20,04	-1,24	0,35	1,000
C - B15		21,30	-1,37	0,99	0,999
C - B30		24,32	-1,58	6,88	0,979

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Constata-se que os valores de ajustes das equações são aceitáveis para o cálculo de  $k$ , com erros relativos médios abaixo de 7% e coeficiente de determinação acima de 0,98. Verifica-se também a importância de garantir bons ajustes para as misturas controle, a fim de verificar a influência do incremento de resistências em relação ao fator água/cimento quando se adiciona o material pozolânico.

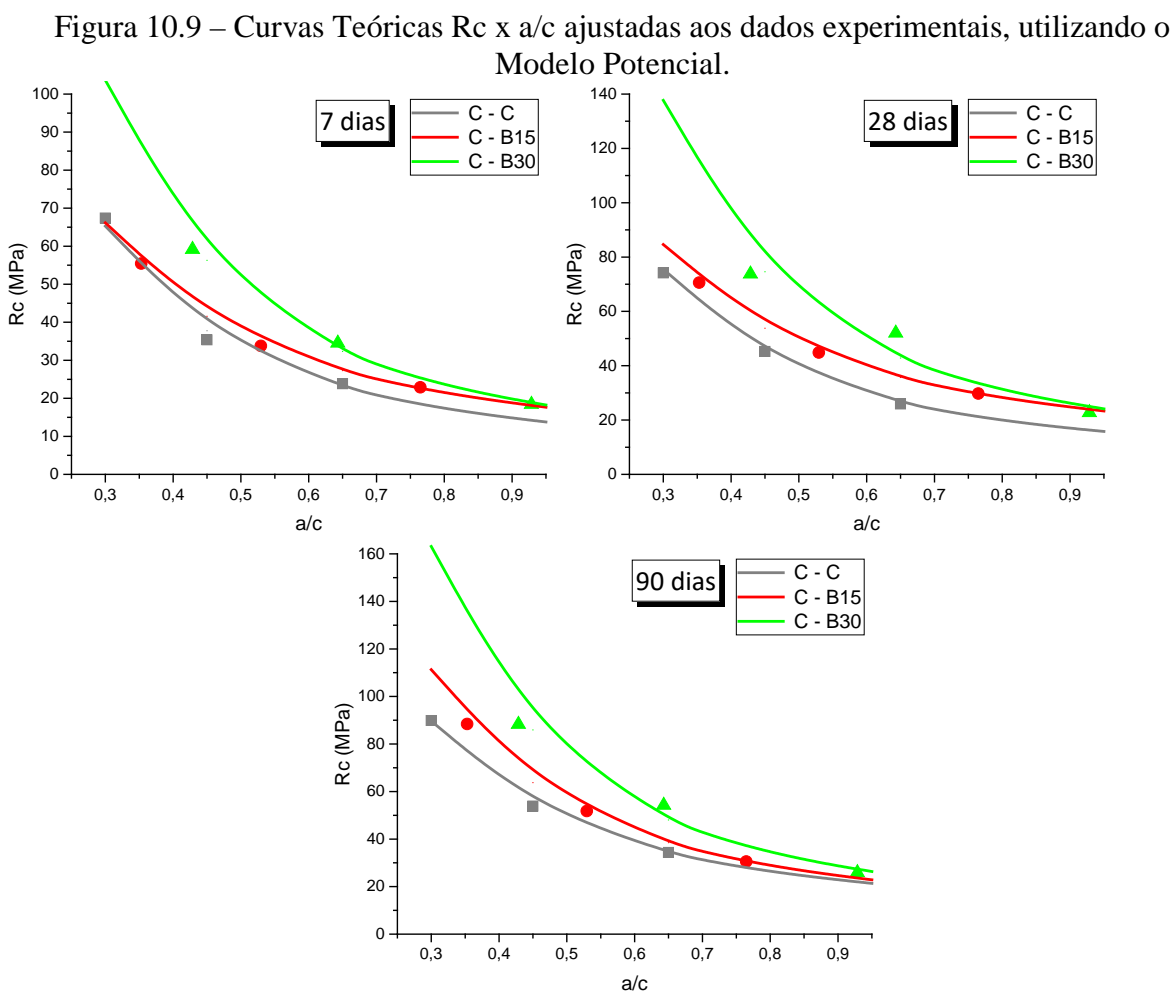
Em particular, apenas as misturas com 30% de CBC apresentaram maior variabilidade entre os dados experimentais e teóricos; de fato, a mistura C – B30 apresentou um erro relativo médio de 11,68% e coeficiente de determinação igual a 0,935.

Entretanto, a comparação entre os demais modelos de ajuste das curvas experimentais (Logarítmico, Linear e Alaejos) deixam claro que o modelo potencial evidenciou os menores erros relativos médios, associados a coeficientes de determinação máximos igual a 1.

### 10.2.2 Curvas Teóricas $R_c$ x $a/c$ ajustadas aos dados Experimentais

A partir das curvas teóricas  $R_c$  x  $a/c$ , seleciona-se então um valor da relação água/cimento efetiva das misturas sem CBC, denominada  $(a/c)_r$ , para então se obter a relação água/cimento das misturas com CBC, denominada  $(a/c)_x$ .

A partir do modelo de regressão Potencial, seguem as curvas teóricas do ajustadas aos dados experimentais (Figura 10.9), correspondentes a cada uma das idades de cura e porcentagem de substituição de CBC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Quando se avalia a exemplificação da Interpretação Física do Fator  $k$  de Eficácia Cimentante, observa-se que as resistências dos concretos com adição de CBC estão sempre acima das resistências das misturas controle, para uma determinada relação água/cimento efetiva. Essa ideia é melhor caracterizada para misturas com altas porcentagens de CBC e para relações  $a/c$  baixas, assim como verificado na porcentagem de ganho de resistência (SG %).

Isso mostra que o fator de eficácia de concretos com CBC é sempre maior que 0, evidenciando seu caráter não inerte.

### 10.3 RESULTADOS DO FATOR $k$ DE EFICÁCIA CIMENTANTE

Na tabela 10.14 abaixo estão tabulados os valores dos coeficientes  $k$  de eficácia cimentante para Concretos com 15% e 30% de CBC em relação à massa de Cimento Portland, ao longo do tempo de cura. Também são apresentados os valores da relação água/cimento efetiva  $(a/c)_r$  e relação água/cimento  $(a/c)_x$  da mistura com pozolana, para o modelo Potencial.

Tabela 10.14 – Valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Concretos em função do tempo de cura, porcentagem de CBC e  $(a/c)_r$  – Modelo Potencial.

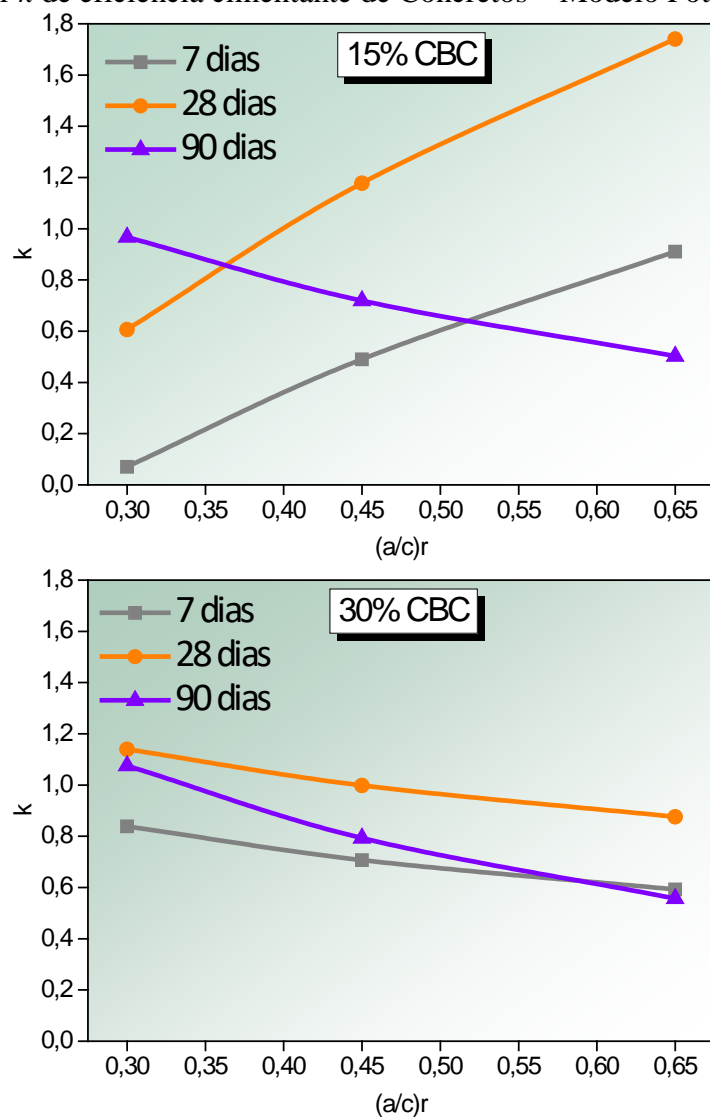
Tempo (dias)	$(a/c)_r$	% CBC (Traço)			
		15% (C – B15)		30% (C – B30)	
		$(a/c)_x$	$k$	$(a/c)_x$	$k$
7	0,3	0,303	<b>0,07</b>	0,408	<b>0,84</b>
	0,45	0,489	<b>0,49</b>	0,586	<b>0,71</b>
	0,65	0,754	<b>0,91</b>	0,815	<b>0,59</b>
28	0,3	0,332	<b>0,61</b>	0,446	<b>1,14</b>
	0,45	0,544	<b>1,18</b>	0,643	<b>1,00</b>
	0,65	0,850	<b>1,74</b>	0,894	<b>0,88</b>
90	0,3	0,351	<b>0,97</b>	0,438	<b>1,07</b>
	0,45	0,507	<b>0,72</b>	0,603	<b>0,79</b>
	0,65	0,708	<b>0,50</b>	0,805	<b>0,56</b>

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os valores de  $(a/c)_x$  são sempre maiores que os valores de  $(a/c)_r$ , e isto quer dizer que os valores de  $k$  são sempre positivos e maiores que 0.

Na Figura 10.10 abaixo foram plotados os valores do coeficiente  $k$  de eficácia cimentante dos Concretos em função da relação água/cimento para o modelo proposto, comparando cada um deles a um teor de substituição fixa (15% e 30% de CBC).

Figura 10.10 – Influência da relação a/c, tempo de cura e porcentagem de CBC nos valores de fator  $k$  de eficiência cimentante de Concretos – Modelo Potencial.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados mostram claramente que o fator de eficácia da CBC é fortemente influenciado pelo tempo de cura, teor de substituição e relação a/c, entretanto não demonstra uma tendência geral muito clara em relação a estes parâmetros.

Apenas a mistura C – B15 – 0,3 indicou um valor muito baixo de eficácia cimentante, tendendo a 0; mesmo assim, não se obtiveram valores negativos de  $k$ , mas sobretudo foram constatados valores acima de 1, levando à conclusão de que a CBC não caracteriza um material inerte.

Independente do teor de substituição de CBC, em geral os dados obtidos confirmam que a máxima atividade pozolânica acontece aos 28 dias de cura, sendo que esta tendência é ainda mais justificada para os traços com relação a/c alta.

Este comportamento não está de acordo com o comportamento evidenciado nas misturas de microconcreto, nas quais estiveram condicionadas à eficácia mais efetivas aos 90 e 365 dias de cura; no geral, a eficácia cimentante de microconcretos constituídos de CBC foram muito baixas aos 28 de cura, da ordem de 0,6. Isso pode evidenciar que as misturas de concreto com CBC apresentam o desenvolvimento mais precoce das reações pozolânicas entre o cimento e a CBC.

Assim como observado nos valores de resistência à compressão e porcentagem do ganho de resistência, aos 7 dias de cura, a CBC leva à obtenção dos menores valores de eficácia cimentante em relação às demais idades. Nesta idade os efeitos de nucleação novamente parecem superar os efeitos de diluição para os traços ricos e médios; de fato, valores efetivos de  $k$  foram obtidos para as misturas com 30% de CBC. Ao mesmo tempo, os efeitos de diluição, associados à redução do consumo de cimento e aumento da relação água/cimento efetiva, estiveram presentes nas misturas com a/c elevados e maior consumo de CBC (30%).

O melhor comportamento do fator  $k$  de eficácia cimentante de concretos com CBC também não pode ser condicionado a apenas um único teor de substituição. Apesar dos ensaios mecânicos conduzirem à utilização de 15% de CBC em relação à massa de cimento Portland, uma análise das resistências a idades muito avançadas (em particular aos 365 dias de cura) poderia confirmar melhor as vantagens de se utilizar um dos teores.

Para 30% CBC, se pode observar que a eficácia cimentante é reduzida à medida em que se incrementa a relação a/c.

Assim como observado nas misturas de microconcreto entre os 90 e 365 dias de cura, existe um distanciamento da eficácia cimentante entre os 7 e 28 dias de cura para os traços de concreto médios e pobres em ambos os teores de substituição. Para as misturas com a/c = 0,65, foram constatados aumentos de 91,2% e 49,2% nos valores de  $k$ , para 15% CBC e 30% CBC, respectivamente (de 0,91 a 1,74 para 15% CBC e de 0,59 a 0,88 para 30% CBC).

O sistema resultante de poros capilares causados pela inclusão de CBC de formato irregular e textura rugosa parece evidenciar maior retenção de água, que pode estar disponível para a hidratação a idades avançadas. Entretanto, essa capacidade da CBC, associada a altos consumos de CBC e água e menores consumos de cimento para os traços com 30%, pode acarretar num aumento de porosidade dos traços e redução da portlandita disponível para as reações com a pozolana, o que pode proporcionar uma redução no ganho de  $k$  para 30% em relação a 15%.

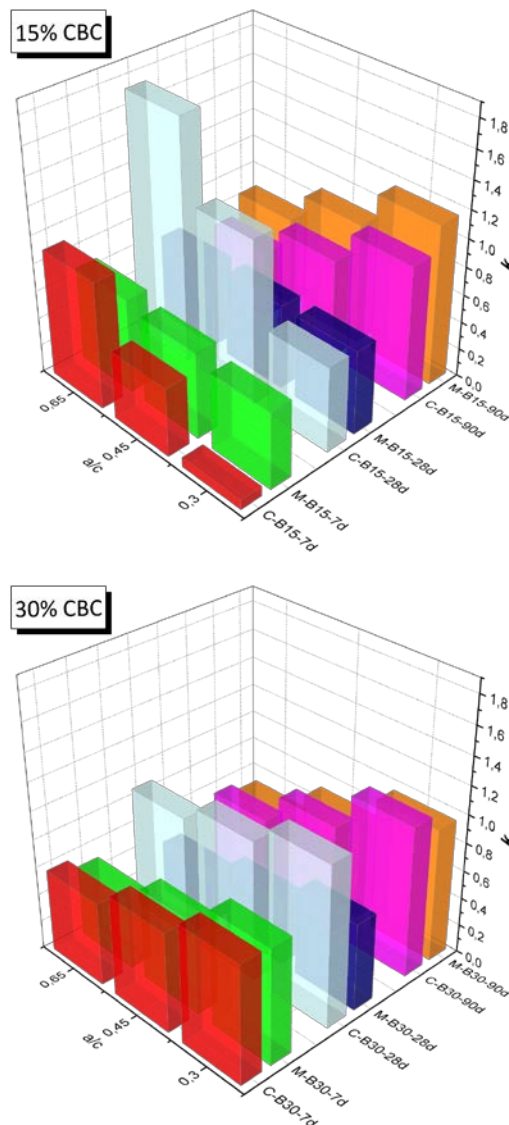
O mesmo distanciamento da eficácia cimentante entre os 7 e 28 dias de cura foi observado para os traços de concreto com a/c baixo (0,3) em ambos os teores de substituição.

Ainda se considera que os aumentos de eficácia foram mais efetivos para as misturas com 15% de substituição, nas quais estas misturas parecem ter e guardar maior quantidade de portlandita disponível para hidratar até o tempo de 90 dias em função do maior consumo de cimento Portland.

### 10.3.1 Comparação do Fator $k$ de Eficácia Cimentante em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” para Concretos e Microconcretos

A partir dos resultados obtidos no item anterior, pretende-se realizar a comparação dos valores de fator  $k$  em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” para as misturas de Concreto e Microconcreto, conforme mostra a Figura 10.11.

Figura 10.11 - Comparação do Fator  $k$  de eficácia cimentante em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c” para misturas de Concreto (C) e Microconcreto (M).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O comportamento exposto acima parece indicar algumas concordâncias entre os valores de  $k$  as misturas de concreto e microconcreto, principalmente para as misturas com 30% de CBC aos 7 e 90 dias de cura. O comportamento mais evidente é observado entre os valores de fator  $k$  e relação água/cimento.

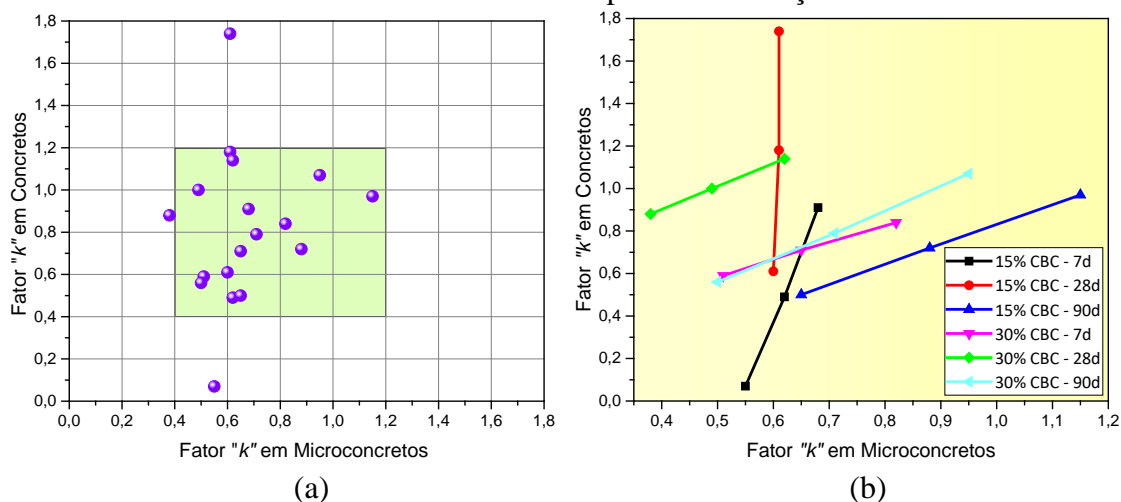
Novamente, a Figura 10.11 deixa explícito que houve um adiantamento da máxima reação pozolânica com CBC ao se produzir concretos, em particular aos 28 dias de cura, com tendência de redução nos valores de  $k$  aos 90 dias de idade. Ao mesmo tempo, nesta idade se efetivou a atividade pozolânica para as misturas de microconcreto.

Se verifica que os valores de  $k$  obtidos para os concretos são maiores que os valores especificados pelas normas Europeias EHE-08 e EN 206:2013 tanto para a cinza volante quanto para a sílica ativa.

A longo prazo, é evidente que as melhores propriedades mecânicas, tanto para concretos, quanto para microconcretos, está para as misturas com relação a/c baixa (da ordem de 0,3) e para 15% de material pozolânico em relação à massa de Cimento Portland. O mesmo efeito foi observado no comportamento do fator de eficácia cimentante de Microconcretos com adição de CBC em termos de “Resistência à Compressão x Consumo CBC”.

Da mesma forma da discussão abordada nos resultados de resistência à compressão axial de concretos, a determinação do coeficiente de eficácia cimentante pode ser diretamente influenciada pelos diversos parâmetros envolvidos na definição das dosagens racionais, como por exemplo a granulometria dos agregados graúdos, o consumo de agregados, além do teor de aditivo superplastificante para manter a mesma trabalhabilidade. Neste sentido, a Figura 10.12 (a) abaixo mostra que os dados de fator de eficácia entre Microconcretos e Concretos são mais dispersos, em relação às demais metodologias aplicadas; entretanto, de acordo com a região sombreada, verifica-se um intervalo bem definido para ambas as misturas, nas quais define valores de eficácia entre 0,4 e 1,2. Ao analisar separadamente os teores de substituição de CBC ao longo do tempo, Figura 10.12 (b) evidencia que as melhores correlações foram obtidas aos 90 dias de cura, para ambos os teores de substituição; além disso, a substituição de 30% de Cimento Portland por CBC também proporcionou melhor correlação entre os dados.

Figura 10.12 – Relação entre a eficácia cimentante de Microconcretos e Concretos, em termos de “Resistência à Compressão x Relação a/c”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O mesmo comportamento foi obtido por Aponte (2010), ao comparar a eficácia de Argamassas e Concretos constituídos de cinzas volantes tanto para baixos teores quanto para altos teores de cal. Para cinzas com baixo teor de CaO e tamanho médio de partícula igual a 26  $\mu\text{m}$ , os valores de eficácia estiveram compreendidos em sua grande maioria entre 0,0 e 0,6 para concretos, e entre 0,0 e 1,0 para argamassas. Ao mesmo tempo, para cinzas com baixo teor de CaO e tamanho médio de partícula igual a 10  $\mu\text{m}$ , os valores de eficácia estiveram compreendidos em sua grande maioria entre 0,4 e 1,0 para concretos, e entre 0,2 e 1,2 para argamassas.

## 10.4 OUTRAS PROPRIEDADES APLICADAS AOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

Considerando que um dos princípios fundamentais do trabalho é de se avaliar a pozolanicidade da Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar em misturas de concreto, também se dará atenção às propriedades de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Elasticidade e Absorção de Água Por Imersão, para as diversas dosagens definidas neste Capítulo.

### 10.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral foram realizados conforme procedimento descrito no item 4.2.8.5 da parte experimental. Para tanto, foram produzidos corpos de prova de Concreto de dimensões 10 x 20 cm, para realização dos ensaios aos 7, 28 e 90 dias de cura.



Os resultados (média e desvio padrão) encontram-se na Tabela 10.15 abaixo.

Tabela 10.15 – Resistência à Tração por Compressão Diametral de Concretos com adição de 0% (C – C), 15% (C – B15) e 30% (C – B30) de CBC em relação à massa de Cimento Portland.

Mistura	Agreg./cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)		
			7	28	90
Resistência à Tração (MPa)					
C – C – 0,30	3,5	0,30	4,1 ± 0,1	5,0 ± 1,0	5,4 ± 0,1
C – C – 0,45	5,0	0,45	2,2 ± 0,4	2,2 ± 0,2	4,1 ± 1,0
C – C – 0,65	7,0	0,65	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,5	2,6 ± 0,4
C – B15 – 0,30	3,5	0,30	4,0 ± 1,2	4,4 ± 0,9	5,2 ± 0,2
C – B15 – 0,45	5,0	0,45	2,8 ± 0,4	2,8 ± 0,4	4,1 ± 0,1
C – B15 – 0,65	7,0	0,65	1,9 ± 0,1	2,0 ± 0,1	2,8 ± 0,0
C – B30 – 0,30	3,5	0,30	3,4 ± 0,1	3,7 ± 0,5	5,7 ± 0,7
C – B30 – 0,45	5,0	0,45	2,5 ± 0,2	3,3 ± 0,1	4,5 ± 0,5
C – B30 – 0,65	7,0	0,65	1,23 ± 0,1	2,2 ± 0,1	2,7 ± 0,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tanto para as misturas controle quanto para as constituídas de CBC, os valores de resistência à compressão se comportam de maneira bastante habitual, nas quais caracteriza um aumento gradual das resistências à medida em que se aumenta o tempo de cura e reduz a relação a/cm.

As misturas com a/cm médio (0,45) são as que melhor caracterizam os incrementos de resistência à tração por compressão diametral, em relação aos traços controle, independentemente do teor de CBC substituído. Da mesma forma, estas misturas não evidenciaram reduções significativas de resistência à compressão axial, o que era de se esperar considerando que as duas resistências estão intimamente relacionadas.

Assim como observado nas propriedades de resistência à compressão e nos valores de eficácia cimentante, as misturas com relação a/c baixas mostram redução nos valores de tração nas idades iniciais, em particular aos 7 e 28 dias, sendo este efeito ainda mais pronunciado para misturas com 30% de CBC. Isso mostra o efeito físico da CBC à curtas idades, mas que, por outro lado, aos 90 dias de cura, o crescimento dos valores de resistência à tração foi substancial, caracterizando seu efeito pozolânico a longas idades. Percebe-se que, entre os 28 e 90 dias de cura, as misturas controle C – C – 0,3 não apresentam ganho expressivo de resistência mecânica, evidenciando que as reações com cimento Portland ocorrem mais precocemente se comparado com a CBC.

Mehta e Monteiro (2008) mencionam que as adições minerais podem ser especialmente efetivas na resistência à tração do concreto, em função da sua capacidade de reagir a temperaturas normais com o hidróxido de cálcio e da formação de silicatos de cálcio hidratados adicionais, que pode levar a uma redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição na interface pasta de cimento-agregado.

Este mesmo efeito foi observado na mistura C – B30 – 0,65, sendo que valores menores de resistência à tração em relação às misturas controle foram obtidos aos 7 dias de cura, entretanto estes valores foram superados aos 28 e 90 dias.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007), ao avaliar os efeitos da inclusão de CBC em concretos com relação  $a/cm = 0,53$ , verificou que existe um aumento gradual dos valores de resistência à tração até 20% de substituição de CBC por cimento Portland. Para porcentagens de substituição de 25% e 30%, verifica-se um decréscimo dos valores de tração, levando à conclusão que o teor ótimo de substituição é de 20% de CBC.

Ainda segundo Cordeiro (2006), os concretos de resistência convencional, com relação  $a/cm = 0,60$  e constituídos de 10%, 20% e 30% de Cinza Ultrafina de Bagaço, apresentam valores típicos de resistência à tração em torno de 3,1 MPa, enquanto os valores obtidos para os concretos de alto desempenho ( $a/cm = 0,35$ ) situam-se em torno de 5,3 MPa. De modo geral, a pozolana reduziu os valores de resistência à tração, em relação às misturas controle.

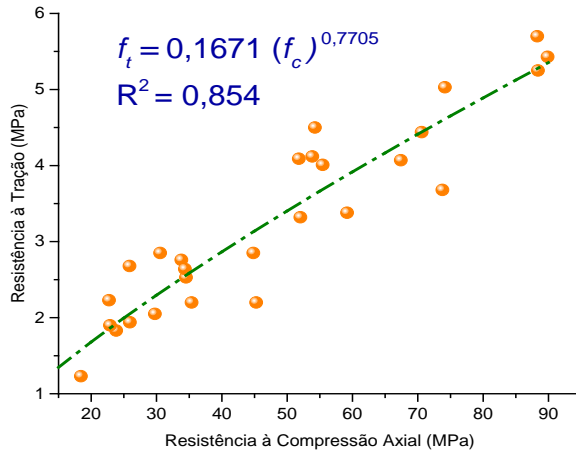
A longas idades, apesar das misturas com 15% de CBC evidenciarem resistências à tração compatíveis com as misturas controle, as misturas com 30% de CBC merecem destaque, considerando que todas as amostras superaram esta propriedade mecânica em relação às misturas sem adição mineral. Incrementos de até 9,2% foram constatados para a mistura C – B30 – 0,45.

Ao avaliar o comportamento das resistências à compressão axial com as resistências à tração por compressão diametral de concretos, Neville (2016) menciona que existem vários modelos de correlação das duas propriedades; para corpos de prova cilíndricos, o autor menciona o modelo obtido por Oluokun (1991) a partir de uma grande quantidade de ensaios realizados por diversos pesquisadores. Para este caso, a fórmula empírica que relaciona  $f_t$  e  $f_c$  é do tipo:

$$f_t = 0,2(f_c)^{0,7} \quad (10.3)$$

Neste sentido, a Figura 10.13 abaixo mostra a correlação entre os valores de resistência à compressão axial e resistência à tração para a gama de concretos produzidos com diversos teores de CBC, relações  $a/cm$  e tempo de cura.

Figura 10.13 – Relação entre a Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência à Compressão, obtida a partir dos dados experimentais.

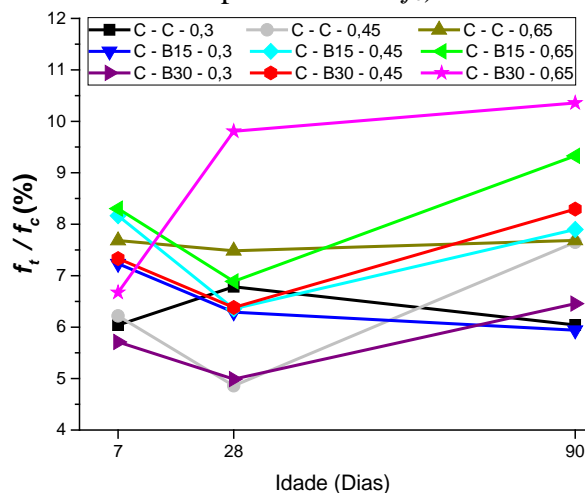


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Quando se avalia a fórmula empírica proposta por Oluokun (1991) que relaciona  $f_t$  e  $f_c$ , se percebe que os dados experimentais descrevem de maneira coerente o modelo proposto. Aplicando-se um modelo de regressão Potencial para descrever o comportamento dos dados de resistência experimentais, verifica-se que os parâmetros de ajuste estão bem próximos dos parâmetros de ajuste da fórmula empírica; ao mesmo tempo, verifica-se que o modelo potencial indica os mais altos valores de coeficiente de determinação, da ordem de 0,85. Isso evidencia que os modelos de previsão da resistência à tração por meio dos valores de resistência à compressão também podem ser aplicados para as misturas de concretos com adição de cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar.

A Figura 10.14 abaixo mostra a relação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral ( $f_t$ ) e resistência à compressão axial ( $f_c$ ) das misturas de concreto.

Figura 10.14 - Relação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral ( $f_t$ ) e resistência à compressão axial ( $f_c$ ) de Concretos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

É evidente que a relação entre as resistências está compreendida entre 5% e 10%, mostrando uma correlação lógica entre as misturas com diferentes relações a/c. De fato, Metha e Monteiro (2008) menciona que a relação  $f_t / f_c$  é da ordem de 10% a 11% para concretos de baixa resistência, de 8% a 9% para os de média resistência e em torno de 7% para os de alta resistência.

Neville (2016) menciona que, conforme os valores de resistência à compressão aumentam, os de tração também aumentam, embora a uma taxa decrescente. Da mesma forma, a um mês de cura, a resistência à tração aumenta mais lentamente do que a resistência à compressão, de modo que a relação  $f_t / f_c$  diminui com o tempo. Este aspecto foi observado para a maioria das misturas até os 28 dias de cura, e esta tendência de menor taxa de crescimento ou redução da razão foi mais caracterizada para as misturas controle.

Ao mesmo tempo, Metha e Monteiro (2008) mencionam que, quanto maior os valores de resistência à compressão, menor é a razão entre os dados, corroborando os efeitos ao se analisar as misturas com a/c baixo (0,3) aos 90 dias de idade.

De maneira geral, as misturas de concretos constituídas de CBC apresentaram maiores valores de resistência à tração em relação aos valores de resistência à compressão, ao longo do tempo de cura e para ambos os teores de substituição. Ainda percebe-se que o crescimento da razão entre as resistências é mais efetivo para relações água/cimento elevadas e bem mais pronunciado aos 90 dias de cura. De fato, a razão de até 10% foi obtida para a mistura C – B30 – 0,65 nesta idade.

Ainda assim, é possível observar que, para uma relação a/c fixa de 0,3, ao passo que aos 28 dias de cura a razão  $f_t / f_c$  é menor entre os traços controle e constituídos de CBC, aos 90 dias o comportamento é invertido, isto é, as misturas com CBC mostram um ganho maior de resistência à tração em relação às misturas controle.

#### **10.4.2 Módulo de Elasticidade**

Segundo Soriano (2007), conhecer o módulo de elasticidade de um concreto é muito importante para determinar a forma de trabalhar com os elementos constituintes das estruturas do concreto. Ou seja, estes componentes considerados separadamente, apresentam módulos de elasticidade muito diferentes entre si; os agregados possuem módulos mais elevados, enquanto que da pasta de cimento este valor é reduzido.

Em materiais heterogêneos e multifásicos como o concreto, a fração volumétrica, a densidade e o módulo dos principais componentes, além da zona de transição na interface pasta

de cimento – agregado, determinam o comportamento elástico do compósito (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Fatores como Módulo de Elasticidade e Porosidade do Agregado, Fração Volumétrica do Agregado, Porosidade na Zona de Transição na Interface, Módulo de Elasticidade e Porosidade da Pasta de Cimento, além das condições de ensaio, são primordiais para se caracterizar o comportamento elástico do concreto.

Os ensaios de Módulo de Elasticidade foram feitos em corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm aos 28 e 90 dias de cura, conforme procedimentos definidos no item 4.2.8.6 da parte experimental. A Tabela 10.16 mostram os resultados obtidos.

Tabela 10.16 – Módulo de Elasticidade de Concretos com adição de 0% (C – C), 15% (C – B15) e 30% (C – B30) de CBC em relação à massa de Cimento Portland.

Mistura	Agreg./cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)	
			28	90
Módulo de Elasticidade (GPa)				
C – C – 0,30	3,5	0,30	46,1 ± 0,6	45,2 ± 1,3
C – C – 0,45	5,0	0,45	33,6 ± 0,7	35,4 ± 1,5
C – C – 0,65	7,0	0,65	29,0 ± 0,8	29,5 ± 1,1
C – B15 – 0,30	3,5	0,30	43,6 ± 0,4	44,6 ± 0,8
C – B15 – 0,45	5,0	0,45	35,5 ± 0,9	35,5 ± 1,0
C – B15 – 0,65	7,0	0,65	28,3 ± 0,8	30,1 ± 2,0
C – B30 – 0,30	3,5	0,30	41,3 ± 1,8	40,5 ± 0,3
C – B30 – 0,45	5,0	0,45	35,9 ± 0,9	37,3 ± 4,9
C – B30 – 0,65	7,0	0,65	26,9 ± 1,1	28,6 ± 3,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

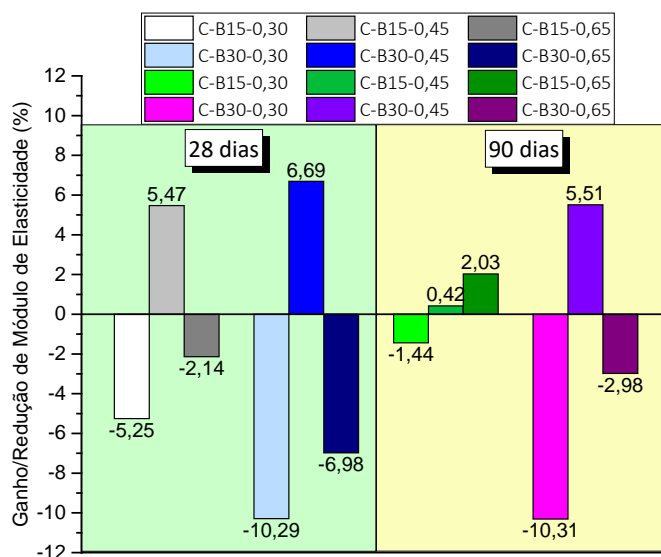
Um comportamento habitual foi constatado quando se analisa o tempo de cura e relação a/cm das amostras. O módulo de elasticidade de concretos sem e com adição de CBC aumentam conforme existe aumento nos valores de resistência à compressão. Além disso, se percebe que os valores de módulo são maiores quando se aumenta a idade de cura dos concretos, e, a longas idades, essa taxa de aumento foi menor que em relação à taxa de aumentos da resistência à compressão.

Os dados mostram claramente que a inserção de CBC nas misturas de concreto provoca redução dos valores de módulo de elasticidade, principalmente para os traços com relação a/c baixas e maior consumo de CBC (Figura 10.15), da ordem de 10% de redução. Por outro lado, as misturas com a/c médio mostram valores ligeiramente superiores de módulo, com incrementos de até 6,7%, independentemente do tempo de cura e porcentagem de CBC.

Além disso, a redução do módulo de elasticidade de concretos com CBC, em relação às misturas controle, foi em sua grande maioria menor aos 90 dias de cura, corroborando os efeitos

causados pela inclusão de CBC nas propriedades de resistência à compressão ao longo do tempo cura.

Figura 10.15 - Porcentagem de Incremento ou redução dos valores de módulo de elasticidade de concretos com CBC, em função da relação a/cm, teor de CBC e idade de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo Paiva (2016), apesar das pozolanas melhorarem as características da zona de transição e proporcionarem aumentos na resistência à compressão, os módulos de elasticidade dos concretos não sofrem a mesma melhoria. Aponte (2010) salienta que, como as relações água/cimento são mais elevadas no entorno dos agregados dos concretos no estado fresco, associado a grandes cristais de etringita e hidróxido de cálcio nestas regiões, geralmente a zona de transição na interface acaba sendo mais porosa.

Scrivener, Crumbie e Laugesen (2004) ainda salientam que a diferença entre os grãos de cimentos e agregados leva a um efeito de parede, nas quais cada partícula de agregado é considerada como um parede que perturba o empacotamento dos grãos de cimento. Como resultado, se obtém uma região próxima dos agregados que contém grãos predominantemente pequenos, mas caracterizada pela maior porosidade. Ao mesmo tempo, os grãos de cimento de maior tamanho encontram-se longe dos agregados.

Neste mesmo sentido, Metha e Monteiro (2008) explanam que os vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de cálcio são relativamente mais comuns na zona de transição na interface do que na matriz da pasta; estes fenômenos, associados à incorporação de pozolanas nas misturas também podem evidenciar diferentes comportamentos nas relações tensão-deformação do concreto.

Por outro lado, as partículas mais grossas de adições minerais podem ser consideradas como microagregados, que melhoram a densidade da pasta de cimento hidratada de uma maneira similar às partículas de cimento anidro. Isto é benéfico com respeito à resistência mecânica, resistência à propagação de fissuras e rigidez (APONTE, 2010).

Para concretos convencionais de classe C25 e constituídos de CBC, Paiva (2016) encontrou valores de módulo de elasticidade da ordem de 22,6 GPa, sendo que reduções de 7,6% e 4,7% foram encontradas para os concretos com 10% e 15% de CBC em relação à massa de cimento Portland, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Para concretos de alto desempenho, de classe C60, estes mesmos teores de CBC evidenciaram incrementos de módulo iguais 3,9% e 2,2%, respectivamente, sendo o valor médio da ordem de 32 GPa.

Da mesma forma que discutido nos resultados de resistência à tração, existem vários modelos que descrevem a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de concretos. Segundo o ACI 318-02 (Equação 10.4) e NBR 6118 (ABNT, 2014) (Equações 10.5 e 10.6), o módulo é proporcional à resistência elevada à potência 0,5. Para cada método, os demais parâmetros da equação são definidos conforme alguns parâmetros peculiares, dentre eles a massa específica das misturas ou características dos agregados.

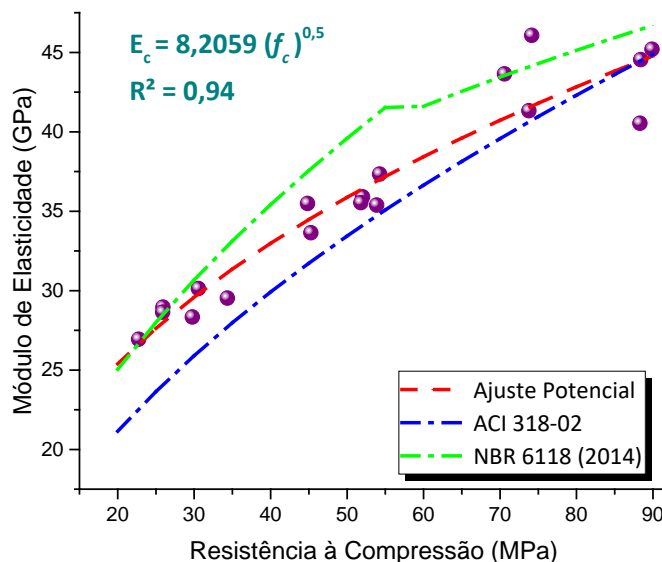
$$E_c = 4,73(f_c)^{0,5} \text{ (ACI 318-02)} \quad (10.4)$$

$$E_c = 5,6(f_c)^{0,5} \text{ para concretos de 20 MPa a 50 MPa (NBR 6118 - ABNT, 2014)} \quad (10.5)$$

$$E_c = 21,5 \left( \frac{f_c}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \text{ para concretos de 55 MPa a 90 MPa (NBR 6118 - ABNT, 2014)} \quad (10.6)$$

Quando são plotados os dados de resistência à compressão axial frente os valores de módulo de elasticidade para as misturas de concreto (Figura 10.16), se percebe que os dados experimentais descrevem de maneira coerente os modelos propostos; além disso, a correlação obtida entre os dados foi bem mais ajustada ao modelo Potencial, também descrito para os modelos teóricos, indicando os mais altos valores de coeficiente de determinação, da ordem de 0,94.

Figura 10.16 – Relação entre Módulo de Elasticidade e Resistência à Compressão, obtida a partir dos dados experimentais, e curvas obtidas a partir de modelos teóricos.



O comportamento das curvas teóricas mostra que, enquanto o modelo proposto pelo ACI 318-02 subestima os valores de módulo para misturas com relação  $a/cm$  elevado, o modelo recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) superestima os dados de módulo de elasticidade para concretos com relação  $a/cm$  médias e baixas.

Apesar disso, os modelos de previsão do módulo de elasticidade por meio dos valores de resistência à compressão também podem ser aplicados às misturas de concretos com adição de cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar. De maneira geral, o modelo recomendado pelo ACI 318-02 evidencia valores mais coerentes aos valores obtidos experimentalmente.

### 10.4.3 Absorção de Água por Imersão

Para que as estruturas de concreto desempenhem suas funções previstas nos projetos estruturais, é necessário que as condições de resistência e durabilidade sejam levadas em conta, para que sejam capazes de suportar os processos de deterioração a que estas estruturas estão expostas.

Segundo Neville (2016), a permeabilidade do concreto à água depende principalmente da relação água/cimento, que determina o tamanho, volume e continuidade dos espaços capilares, da estrutura da pasta de cimento endurecida e da dimensão máxima do agregado, que pode influenciar as microfissuras na zona de transição da interface pasta de cimento – agregado.



O ensaio de Absorção de Água por Imersão foi realizado conforme procedimento descrito no item 4.2.8.7 da parte experimental. Para tanto, foram produzidos corpos de prova cilíndricos de Concreto de dimensões 10 x 20 cm, para realização dos ensaios aos 28 e 90 dias de cura. Os resultados obtidos estão explicitados na Tabela 10.17 abaixo.

Tabela 10.17 – Absorção de Água por Imersão de Concretos com adição de 0% (C – C), 15% (C – B15) e 30% (C – B30) de CBC em relação à massa de Cimento Portland.

Mistura	Agreg./cm	a/cm	Tempo de Cura (dias)	
			28	90
Absorção (%)				
C – C – 0,30	3,5	0,30	2,47 ± 0,10	1,93 ± 0,13
C – C – 0,45	5,0	0,45	3,26 ± 0,10	2,64 ± 0,09
C – C – 0,65	7,0	0,65	4,77 ± 0,10	3,74 ± 0,12
C – B15 – 0,30	3,5	0,30	2,07 ± 0,04	1,72 ± 0,14
C – B15 – 0,45	5,0	0,45	2,90 ± 0,05	2,47 ± 0,12
C – B15 – 0,65	7,0	0,65	4,41 ± 0,10	3,68 ± 0,09
C – B30 – 0,30	3,5	0,30	2,04 ± 0,15	1,81 ± 0,09
C – B30 – 0,45	5,0	0,45	2,83 ± 0,05	2,56 ± 0,11
C – B30 – 0,65	7,0	0,65	4,40 ± 0,19	3,71 ± 0,12

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo Neville (2016), bons concretos apresentam absorção bem menor do que 10%, em massa. Isso mostra que os concretos produzidos apresentaram valores satisfatórios de absorção de água por imersão. Os efeitos dos ensaios de empacotamento granular para obtenção do teor ótimo de argamassa, bem como o uso de aditivos superplastificantes e ausência de segregação e exsudação parecem ter garantido os resultados esperados.

Os dados obtidos revelam que a relação água/cimento das misturas influenciaram diretamente nos valores de absorção de água por imersão. Isso indica mais uma vez que um aumento na relação a/c se traduz no aumento dos espaços não preenchidos pelos produtos de hidratação, junto ao incremento da quantidade de água que recobre os agregados, o que gera uma maior porosidade na zona da interface pasta – agregados. Em relação às misturas com relação a/c baixa, as misturas com relação a/c médio e alto apresentaram reduções em torno de 35% e 95%, respectivamente, referente às misturas sem adição de CBC. Para os traços constituídos de CBC, em relação às misturas com relação a/cm=0,3, as misturas com relação a/cm=0,45 e 0,65 apresentaram reduções em torno de 40% e 110%, respectivamente.

Além disso, também pode se perceber que a estrutura dos poros foi modificada com o tempo de hidratação dos concretos, tanto para as misturas sem adição de pozolana quanto para

as misturas com adição. Os valores de absorção foram reduzidos dos 28 para os 90 dias de cura, da ordem de 20% para as misturas sem adição de pozolana.

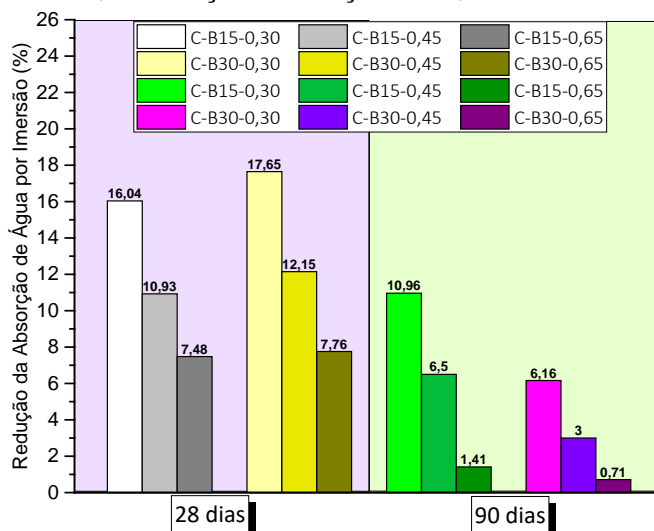
Neste sentido, também pode se confirmar os benefícios causados pela inserção de CBC nas propriedades de absorção de água por imersão de concretos. Apesar das imagens de micrografia mostrarem o caráter poroso e irregular da CBC, as reduções nos valores de absorção em relação às misturas controle podem estar atribuídos à atividade pozolânica da cinza e ao refinamento da estrutura de poros. Ao mesmo tempo, a elevada superfície específica e massa específica da CBC, bem como a distribuição do tamanho de partículas, podem ter levado à maior densificação da pasta de cimento.

Os dados também estão de acordo com o comportamento obtido para os ensaios de absorção por capilaridade de argamassas com CBC, nas quais evidencia que a CBC proporciona redução dos valores em relação às misturas controle. Isto é, associando o comportamento similar entre os dois ensaios, leva-se à conclusão de que a estrutura dos poros presentes nos concretos contendo CBC apresenta menor interconectividade, da mesma forma que observado nos ensaios de microscopia.

Em relação aos 28 dias de hidratação, foram constatadas reduções de aproximadamente 16% para as misturas com 15% de CBC, aos 90 dias de cura, ao passo que as misturas com 30% de CBC reduzem, em média, 12% dos valores de absorção por imersão. Se comparado com as misturas controle, que apresentaram reduções da ordem de 20%, o fechamento de poros de concretos com CBC parece ser mais gradual. Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) mostrou uma redução considerável dos valores de absorção por imersão de concretos constituídos de CBC, de até 50% após os 90 dias de cura, para relação a/cm médios.

Quando se avalia a redução dos valores de absorção para os diversos teores de CBC e tempo de cura (Figura 10.17), em relação às misturas controle, fica evidente que, apesar das misturas C – B30 apresentarem dados ligeiramente inferiores às misturas C – B15 aos 28 dias de cura, este comportamento é alterado aos 90 dias; isso deixa claro que os menores coeficientes estão para as misturas com 15% de CBC em relação à massa de cimento Portland. Além disso, aos 90 dias de cura, as maiores porcentagens de redução foram obtidas para as misturas com relação a/cm baixas, em que a melhor densificação das matrizes cimentícias de microconcretos esteve associada às misturas com relação a/cm baixa e substituição de 15% de cimento Portland por CBC.

Figura 10.17 - Porcentagem de redução dos valores de absorção de água por imersão para concretos com CBC, em função da relação a/cm, teor de CBC e idade de cura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

## 10.5 CONCLUSÕES

A avaliação das misturas de concreto vem conduzir às seguintes conclusões:

- A resistência mecânica de concretos constituídos de CBC são, de maneira geral, ligeiramente inferiores aos concretos controle nas idades iniciais. Por outro lado, em função da equivalência de resistências entre as misturas com e sem adição de CBC, fica evidente que as reações da CBC com o hidróxido cálcico liberado durante a hidratação do cimento podem ser mais efetivas a longas idades de cura.
- Analogamente às misturas de microconcretos, o modelo que melhor se ajustou às curvas  $R_c \times a/c$  foi o Potencial, conduzindo à obtenção de valores de eficácia sempre acima de zero, o que vem a caracterizar a reatividade potencial da CBC.
- De modo geral, os dados obtidos confirmam que a eficácia da CBC por meio da produção de concretos é fortemente expressiva aos 28 dias de cura.
- Enquanto que a inclusão de CBC proporcionou um aumento nos valores de resistência à tração por compressão diametral, os dados de módulo de elasticidade foram reduzidos com a inclusão do material pozolânico. Além disso, é de suma importância salientar que os modelos de previsão da resistência à tração e módulo de elasticidade por meio dos valores de resistência à compressão também podem ser aplicados para as misturas de concretos com adição de CBC.

## Capítulo VI

### Conclusões e Trabalhos Futuros

#### 11.1 CONCLUSÕES GERAIS

A metodologia proposta neste trabalho de doutorado consistiu em se determinar o fator  $k$  de eficácia cimentante da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), por meio do estudo da propriedade mecânica de resistência à compressão em microconcretos e concretos de cimento Portland. Neste sentido, o fator de eficácia é definido como a fração de CBC incorporada em tais compósitos e que se considera equivalente ao cimento Portland em termos da propriedade mecânica avaliada.

A aplicação dos ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Granulometria por Difração à Laser (ADL), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) levou à conclusão de que a CBC apresenta caráter reativo, apresentando um teor de óxidos bastante expressivo. Além disso, as composições de pastas de cal/CBC, cimento/CBC e argamassas de cal/CBC evidenciaram a formação dos produtos de hidratação através dos ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica, Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), permitindo avaliar o desenvolvimento das reações da pozolana com o hidróxido cálcico ao longo do tempo de cura.

Além disso, a metodologia implementada para avaliar a reatividade da CBC por meio das propriedades elétricas de condutividade/resistividade e impedância se mostrou relevante. O modelo experimental proposto levou à condução de comportamentos bastante similares entre as medidas de condutividade/resistividade  $dc$  e a espectroscopia de impedância elétrica, que utiliza o circuito  $ac$ ; isso mostra a relevância de se apresentar uma nova perspectiva para avaliação do processo de hidratação a curtos e longos tempos de cura, para argamassas de cimento Portland e CBC.

Neste sentido, os mecanismos de hidratação das argamassas foram alterados nas horas iniciais de cura com a inserção de CBC, mostrando que, nestes períodos, a formação das fases hidratadas se comportou de maneira mais tardia em relação às misturas controle. Ao mesmo tempo, o desenvolvimento das reações pozolânicas a longo prazo também foram caracterizadas

pelas medidas elétricas, mostrando que a CBC possui capacidade de reagir com a portlandita, o que leva à formação dos produtos de hidratação e redução da conectividade dos poros.

O desenvolvimento das propriedades mecânicas de argamassas, microconcretos e concretos se deu por meio de diversos parâmetros de dosagem, dentre eles a relação agregado/cimento, relações água/cimento e água/material cimentante, teor de substituição ou adição de CBC e tempo de cura das amostras. Neste sentido, os compósitos constituídos de CBC podem igualar as resistências mecânicas à compressão com as resistências das misturas controle, entretanto este comportamento depende significativamente dos parâmetros envolvidos. Além disso, a inserção de CBC nas misturas de concreto também proporcionou benefícios nas propriedades de resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão.

A validade da abordagem da eficácia cimentante em concretos foi alcançada por meio de uma metodologia que trouxe a equivalência entre a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e o cimento Portland em termos de resistência mecânica à compressão.

Quando se avalia os valores de fator  $k$  da CBC por meio da produção de microconcretos e em termos de resistência à compressão x relação água/cimento, pode-se inferir que os dados mais expressivos foram associados às menores porcentagens de cimento Portland substituído por CBC e às menores relações a/c, atribuindo a máxima atividade pozolânica aos 365 dias de cura. De modo geral, foram constatados valores de  $k$  maiores que 1, nas quais se pode substituir cimento por um consumo menor de pozolana para alcançar uma mesma resistência, mantendo-se a relação a/c.

Entretanto, o coeficiente  $k$  de eficácia cimentante da CBC não é único, o que leva a concluir que diversas variáveis podem alterar o comportamento cimentante da adição mineral. Parâmetros como “relação água/cimento”, “idade de cura”, “consumo de CBC”, além dos efeitos de “diluição e nucleação heterogênea” e “disponibilidade de portlandita” estiveram associados aos comportamentos obtidos.

De fato, foi verificado que maiores consumos de cimento proporcionaram maior quantidade de portlandita disponível para as reações, que, associado a ambientes altamente alcalinos, se permitiu levar a CBC a reagir em maior velocidade. Ao mesmo tempo, altas porcentagens de CBC remeteram aos efeitos físicos a curtas idades, ao passo que porcentagens menores de CBC estiveram associadas aos efeitos pozolânicos a longas idades de cura.

Mantendo-se o consumo de cimento Portland e água, foram avaliados os valores de fator  $k$  da CBC por meio da produção de microconcretos e em termos de resistência à compressão x consumo de CBC. Neste caso, a adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em microconcretos provém as propriedades mecânicas de resistência e, conseqüentemente, a eficácia cimentante da pozolana. Se verificou que os valores de  $k$  obtidos para a CBC através do método foram superiores aos valores especificados pelas normas Europeias EHE-08 e EN 206-1:2013, tanto para a cinza volante quanto para a sílica ativa. Sendo assim, foram constatados valores de  $k$  próximos a 3, nas quais se pode substituir cimento por um consumo menor de pozolana para alcançar uma mesma resistência, mantendo-se a relação  $a/c$ .

De modo geral, o modelo proposto mostrou que existe um teor ótimo de CBC adicionada, nas quais o fator de eficácia é máximo e que pode estar compreendido entre 3% e 18% de substituição em massa de cimento Portland por pozolana.

Apesar da CBC evidenciar um caráter predominantemente cristalino, não foram verificados valores nulos ou negativos de fator  $k$ , o que classificaria o material como inerte. Por outro lado, a adição de quartzo triturado conduziu à obtenção de valores de eficácia abaixo de zero, indicando que os valores negativos de  $k$  não apresentam significado físico.

De modo geral, tanto para as misturas de microconcretos quanto para concretos, os valores de eficácia estiveram compreendidos entre 0,4 e 1,2, em termos de resistência à compressão x relação água/cimento. Isso mostra que o fator de eficácia da CBC pode ser igual ou estar acima da unidade, o que permite substituir cimento por um consumo menor de pozolana para se obter a uma mesma resistência mecânica, mantendo-se a relação  $a/c$ .

Os dados de eficácia cimentante mostraram que a velocidade das reações pozolânicas pela inclusão de CBC é mais lenta, e que os mecanismos de hidratação das matrizes cimentícias são governados pelos efeitos físicos, de diluição e nucleação, além dos efeitos químicos, de combinação com a portlandita liberada durante as reações de hidratação com o cimento Portland.

Além disso, a combinação de todas as análises deste trabalho permite inferir que a substituição de 5% a 20% de cimento Portland por cinza do bagaço de cana-de-açúcar conduziu à obtenção dos valores mais expressivos de eficácia cimentante da CBC em concretos à base de cimento Portland a longos tempos de cura.

## 11.2 TRABALHOS FUTUROS

A partir da pesquisa realizada, sugerem-se os seguintes tópicos para estudos futuros:

- Ampliar as metodologias e resultados associados aos ensaios de condutividade/resistividade e impedância elétricas, por meio da inserção de novos materiais pozolânicos, além de explorar novos modelos de cura das amostras de argamassa e a avaliar o comportamento elétrico em pastas de cimento.
- Explorar a eficácia de novos materiais pozolânicos advindos dos subprodutos da agroindústria, dentre eles a cinza da folha da cana-de-açúcar, a partir das metodologias propostas neste trabalho.
- Difundir o comportamento da eficácia cimentante da cinza do bagaço da cana-de-açúcar a partir dos estudos de durabilidade de argamassas, microconcretos e concretos, utilizando como por exemplo os ensaios de carbonatação e penetração de cloretos;
- Aprimorar o número de misturas de concreto para se obter um maior refinamento das curvas de resistência à compressão em função da relação água/cimento; com isso, permite-se obter um padrão de comparação mais racional entre os valores de eficácia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar a partir de misturas de microconcretos e concretos;
- Correlacionar de maneira mais efetiva o comportamento da eficácia cimentante da cinza do bagaço da cana-de-açúcar a partir de novos ensaios de caracterização das pastas, principalmente nas idades iniciais de cura.
- Incorporar novos teores de substituição de cimento Portland por cinza da cinza do bagaço da cana-de-açúcar no entorno de 15%, de forma a verificar se novas porcentagens ótimas de substituição podem ser encontradas.

## Capítulo VII

### Referências

ABDELKADER, B.; EL-HADJ, K.; KARIM, E. Efficiency of granulated blast furnace slag replacement of cement according to the equivalent binder concept. **Cement & Concrete Composites**. Kayseri, v. 32, p. 226-231, 2010.

ABREU, AGUIDA GOMES. **Efeito das Adições Minerais na Resistividade Elétrica de Concretos Convencionais**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia Curso de Pós-Graduação Em Engenharia Civil - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 1998.

ALAEJOS, G; FERNÁNDEZ, M. El coeficiente de eficacia de las cenizas volantes. **Cemento Hormigón**, v. 747, p. 746-770, 1985.

ALAVEZ-RAMIREZ, R., MONTES-GARCIA, P., MARTINEZ-REYES, J., ALTAMIRANO-JUAREZ, D.C., GOCHI-PONCE, Y. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 296-305, 2012.

ALVAREZ, G. L.; NAZARI, A.; BAGHERI, A.; SANJAYAN, J. G. DE LANGE, C. Microstructure, electrical and mechanical properties of steel fibres reinforced cement mortars with partial metakaolin and limestone addition. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 135, p. 8-20, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM: **ASTM C 618**: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. New York, 2015.

ANDRADE, C.; BLANCO, V.M.; COLLAZO, A; KEDDAM, M.; NÓVOA, X.R.; TAKENOUTI, H. Cement paste hardening process studied by impedance Spectroscopy. **Electrochimica Acta**, v. 44, p. 4313-4318, 1999.

APONTE, D. F. **Un estudio de la eficacia cementante de las cenizas volantes**. Universitat Politecnica de Catalunya, PhD thesis, Barcelona, 2010.

APONTE, D. F.; BARRA, M.; VÁZQUEZ, E. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 30, p. 537-546, 2012.

ARENAS-PIEDRAHITA, J. C.; MONTES-GARCÍA, P.; MENDOZA-RANGEL, J. M.; LÓPEZ CALVO, H. Z.; VALDEZ-TAMEZ, P. L.; MARTÍNEZ-REYES, J. Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 105, p. 69-81, 2016.



ARIF, E. CLARK, A. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 128, p. 287-297, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739**: concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos concreto. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos concreto. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: argamassa e concreto - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522**: concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: materiais pozolânicos - requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBRNM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento o tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

BABU, K.G.; HAO, G.S.N. Efficiency of fly ash in concrete. **Cement and Concrete Composites**, Kayseri, v.15, p. 223-229, 1993.

BABU, K.G.; PRAKASH, P.V.S. Efficiency of Silica Fume in Concrete. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 25, n. 6. p. 1273-1283, 1995.

BADOGIANNIS, E.; AGGELI, E.; PAPADAKIS, V. G.; TSIVILI, S. Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion e Binding model and of the k-value concept. **Cement & Concrete Composites**. Kayseri, v. 63, p. 1-7, 2015.

BADOGIANNIS, E.; PAPADAKIS, V. G.; CHANIOTAKIS, E.; TSIVILIS, S. Exploitation of poor greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k value. **Cement and concrete research**, Kidlington, v. 34, p. 1035-1041, 2004.

BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; DEV, V. G.; SANTHANAM, M. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in Concrete. **Cement & Concrete Composites**. Kayseri, v. 59, p. 77-88, 2015.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; SHAMSAEI, E.; BAHADORI, A. Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 31, n. 1, p. 22–8, 2013.

BHANJA, S. Predictor models for evaluation of efficiency factors of fly ash in concrete. **Advances in Structural Engineering**, v. 3, p. 1761-1771, 2015.

BIJEN, J., SELST, R. V. Cement equivalence factors for fly ash. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 23, p. 1029-1039, 1993.

BIOELETRICIDADE. **Usina Santa Adélia**. Disponível em: <<http://site.usinasantaadelia.com.br/index.php>> Acesso em: 15 dez. 2016.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J. “Mechanisms of cement hydration”, **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 41, p. 1208–1223, 2011.

CABEZA, M.; MERINO, P.; MIRANDA, A.; NÓVOA, X.R.; SANCHEZ, I. Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 32, p. 881-891, 2002.

CABEZA, M.; KEDDAM, M.; NÓVOA, X. R.; SÁNCHEZ, I.; TAKENOUTI, H. Impedance spectroscopy to characterize the pore structure during the hardening process of Portland cement paste. **Electrochimica Acta**. v. 51, p. 1831–1841, 2006.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. Rio de Janeiro. LTC. 8ª Edição, 2012.

CHINAGLIA, D.L.; GOZZI, G.; ALFARO, R.A.M.; HESSEL, R. Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 4, 4504, 2008.

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

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>> Acesso em: 24 mai. 2017.

CONCRETO, PORTAL DO. **Microconcreto**. São Pulo: Portal do concreto, 2015. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/54/artigo285205-1.aspx>>. Acesso em: 4 Jan. 2015.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese (Doutorado Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. 445f.

CORDEIRO, G.C., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., FAIRBAIRN, E.M.R.. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement Concrete Composites**, Kayseri, v. 30. p. 410–18, 2008.

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**, Guildford, n. 23, p. 3301–3, 2009.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 29, p. 641-646, 2011.

CORDEIRO, G.C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 97, p. 41–49, 2017.

CRUZ, J.M.; FITA, I.C.; SORIANO, L.; PAYÁ, J. J.; BORRACHERO, M.V. The use of electrical impedance spectroscopy for monitoring the hydration products of Portland cement mortars with high percentage of pozzolans. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, n. 50, p. 51–61, 2013.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 36, p. 264-277, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. “**Adições minerais para concreto Estrutural**”. Em: *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. ed. Isaia, G. C. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 345-379.

DONG, BIQIN; ZHANG, JIANCHAO; WANG, YANSHUI; FANG, GUOHAO; LIU, YUQING; XING, FENG. Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 119, p. 16–20, 2016.

DOTELLI, G.; MARI, C. M. The evolution of cement paste hydration process by impedance spectroscopy. **Materials Science and Engineering**. v. A303. p. 54–59. 2001.

EUROPEAN STANDARD. **BS EN 206**. Concrete: Specification, performance, production and conformity. Brussels, 2013.

FAPESP. Fapesp na mídia. **Resíduos da produção de cana de açúcar**. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/namidia/noticia/109777/residuos-producao-cana-acucar/>>. Acesso em: 23 fev. 2017.

FARIA, E. F. de. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2004. 130 p.

FRÍAS, M., VILLAR, E., SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement & Concrete Composites**. Kayseri, v. 33, p. 490-6, 2011.

FUSARI, D. G. **Efeito do uso de resíduos do caulim e granito na regressão de resistência em microconcreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2008.

GANESAN, K., RAJAGOPAL, K., THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, Kayseri, v. 29, n. 6, p. 515-524, 2007.

GASTALDINI, A.L.G.; ISAIA, G.C.; HOPPE, T.F.; MISSAU, F.; SACILOTO, A.P. Influence of the use of rice husk ash on the electrical resistivity of concrete: A technical and economic feasibility study. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 23, p. 3411–3419, 2009.

GOPALAN, M. K., HAQUE, M. N. Design of fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v.15, n. 4, p. 694-702, 1985.

GOPALAN, M. K. Efficiency, skin strength and sorptivity of fly ash concretes. **Materials and Structures**, London, v. 28, 235-240, 1995.

GORISSE, F. **Ensayos y control de los hormigones**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1981.

GRUYAERT, E.; MAES, M.; BELIE, N. Performance of BFS concrete: k-Value concept versus equivalent performance concept. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 47, p. 441-455, 2013.

GU, PING; XIE, PING; BEAUDOIN, J. J.; BROUSSEAU, R. A.C. Impedance Spectroscopy (Ii) : Microstructural Characterization of Hydrating Cement-Silica Fume Systems. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 23, p. 157-168, 1993.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1993.

HO, D.W.S.; LEWIS, R.K. Effectiveness of fly ash for strength and durability of concrete. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v.15, 793-800, 1985

HOPPE, T. F. **Resistividade Elétrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. 146p

HUSAIN, A.; KUPWADE-PATIL, K; AL-AIBANI, A. F.; ABDULSALAM, M. F. In situ electrochemical impedance characterization of cement paste with volcanic ash to examine early stage of hydration. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 133, p. 107–117, 2017.

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

KOCABA, V., GALLUCCI, E., SCRIVENER, K. L., “Methods for Determination of Degree of Reaction of Slag in Blended Cement Pastes”. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 42, pp. 511–525, 2012.

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

LOLLINI, F.; REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete. **Cement Concrete Composites**, Kayseri, v. 46, p. 32-40, 2014.

LUBECK, A. **Resistividade Elétrica De Concretos De Cimento Portland Branco E Elevados Teores De Escória De Alto Forno**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

LÜBECK, A.; GASTALDINI, A. L. G.; BARIN, D. S.; SIQUEIRA, H. C. COMPRESSIVE STRENGTH AND ELECTRICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH WHITE PORTLAND CEMENT AND blast-furnace slag. **Cement Concrete Composites**, Kayseri, v. 34, p. 392-399, 2012.

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

MANCHIRYAL, R. K.; NEITHALATH, N. Analysis of the influence of material parameters on electrical conductivity of cement pastes and concretes. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 61, No. 4, May, 257–270, 2009.

MANSANEIRA, EMERSON CARLOS. **Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010. 116f.

MARTÍNEZ-VELANDIA, D. **Factor k de eficacia cementante de puzolanas: parámetros experimentales y modelos de cálculo**. D. Diploma de Estudios Avanzados, Univ. Politécnica de Valencia, 2003.

MARTÍNEZ-VELANDIA, D. **Caracterización y reactividad de materiales puzolánicos: el humo de sílice y su estado de densificación**. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2006.

MARTIRENA, J.F., MIDDENDORF, B., GEHRKE, M., BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana inlime-pozzolana binders: study of the reaction. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 28, p. 1525–36, 1998.

MC CARTER, W. J.; STARS, G.; CHRISP, T. M. Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 30. p. 1395-1400, 2000.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of Cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 107, p. 11–16, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MINISTERIO DE FOMENTO. **EHE-08**. Instrucción de hormigón estructural. Madrid, 2011.

MORALES, E.V., VILLAR-COCIÑA, M.F., SANTOS S.F., SAVASTANO, J.R.H. Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. **Cement and Concrete Composites**, Kayseri, v. 31, n. 1, p. 22–8, 2009.

MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ J.; TASHIMA, M. M. Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 94, p. 670–677, 2015.

MURUMI, K; GUPTA, S. Evaluating the Efficiency Factor of Fly Ash for Predicting Compressive Strength of Fly Ash Concrete. **Advances in Structural Engineering**, v. 3, p. 1747-1757, 2015.

NETTO, RAFAEL MANTUANO. **Materiais Pozolânicos**. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto** / A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. Ed. – Porto Alegre : Bookman, 2016.

ONER, A.; AKYUZ, S.; YILDIZ, R. An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 35, p. 1165-1171, 2005.

O'REILLY DÍAZ, VITERVO. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Pini, 1998. 122 p.

ORTEGA, J.M.; SÁNCHEZ, I.; CLIMENT, M. A. Impedance spectroscopy study of the effect of environmental conditions in the microstructure development of OPC and slag cement mortars. **Archives of civil and mechanical engineering**, v. 15, p. 569-583, 2015.

PAIVA, OTÁVIO AUGUSTO. **Durabilidade de concretos contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016. 282 p.

PAPADAKIS, V. G., TSIMAS, S. Supplementary cementing materials in concrete. Part I: efficiency and desing. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 32, n. 10, p. 1525-1532, 2002.

PAPADAKIS, V. G., ANTIOHOS, S., TSIMAS, S. Supplementary cementing materials in concrete. Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 32, n. 10, p. 1533-1538, 2002.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. 60 f.

J PAYÁ; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAZ-PINZÓN, L.; ORDÓNEZ, L. M. 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, 2002.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SERNA, P.; VELÁZQUEZ, S., ORDOÑEZ, L. M. El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas. **VIII Congreso nacional de propiedades mecánicas de sólidos** . Grandia, 2002.

PAYÁ, J. ; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; VELÁZQUEZ, S. Cement equivalence factor evaluations for fluid catalytic cracking catalyst residue. **Cement Concrete Composites**, Kayseri, v. 39, p. 12–17, 2013.

PEREIRA, ADRIANA MARIA. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2014. 207 f.

PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ J. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, v. 41, p. 13012–13024, 2015.

PINHEIRO, SAMANTHA COELHO. **Influência de sílica gel e de partículas micro e sub micrométricas produzidas a partir da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na hidratação, reologia, estrutura de poros e comportamento mecânico de pastas de cimento.** Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2015. 270 f.

POLDER, R. B. Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 5. p. 125-131. 2001.

QUARCIONI, VALDECIR ANGELO. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2008. 172 f.

REBEQUE, PAULO VINÍCIUS DOS SANTOS. **Síntese e caracterização elétrica de compósitos poliméricos condutores com o poliuretano derivado de óleo de mamona como matriz.** Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Física da Matéria Condensada, 2011. 88 f.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas da palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias.** Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012. 153 f.

ROSSIGNOLO, J. A.; RODRIGUES, M. S.; FRIAS, M.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JUNIOR, H. Improved interfacial transition zone between aggregate-cementitious matrix by addition sugarcane industrial ash. **Cement and Concrete Composites**, Kayseri, v. 80, p. 157-167, 2017.

SANJUÁN, M. A.; PIÑEIRO, A.; RODRÍGUEZ, O. Ground granulated blast furnace slag efficiency coefficient (k value) in concrete. Applications and limits. **Nota Técnica - Materiales de Construcción**, v. 61, n. 302, p. 303-313, 2011.

SANISH, B.; NEITHALATH, N.; SANTHANAM, M. Monitoring the evolution of material structure in cement pastes and concretes using electrical property measurements. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 49, p. 288–297, 2013.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006, 161f.

SCRIVENER, K. L., CRUMBIE, A. K., & LAUGESSEN, P. The interfacial transition zone between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, v. 12, p. 411-421, 2004.

SINHA, D. A. Evaluation of Cementing Efficiency of Flyash in Concrete. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, n. 5, p. 44-49, 2014

SILVA, MICHAEL JONES DA. **Obtenção e caracterização de nanocompósitos de borracha natural reforçada com nanofibras de celulose recobertas com polianilina.** Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013. 168 f.



SINGH, N.B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 30, n. 9, p. 1485–8, 2000.

SMITH, I. A. Design of fly ash concretes. **Proceedings of the institution of civil engineers**, v. 36, p. 769-790, 1967.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>> Acesso em: 1 jun. 2017.

SORIANO, L. **Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC)**. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2007.

SOUZA, A.E., S.R. TEIXEIRA, SANTOS, G.T.A., COSTA, F.B., LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2774-80, 2011.

SUN, H; REN, Z.; MEMONB, S. A.; ZHAO, D.; ZHANG, X.; LI, D.; XING, F. Investigating drying behavior of cement mortar through electrochemical impedance spectroscopy analysis. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 135, p. 361–368, 2017.

TANG, S. W.; LI, Z. J.; SHAO, E. C. Characterization of early-age hydration process of cement pastes based on impedance measurement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 68, p. 491–500, 2014.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. 80f.

TASHIMA, M. M. **Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del silicoaluminato cálcico vítreo (VCAS)**. Tese (Doutorado) – Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, 2012. 454 f.

TSONOS, C.; STAVRAKAS, I.; ANASTASIADIS, C.; KYRIAZOPOULOS, A.; KANAPITSAS, A.; TRIANTIS, D. Probing the microstructure of cement mortars through dielectric parameters' variation. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 70, p. 576–583, 2009.

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

VAILLANT, JOÃO MARCOS MIRANDA. **Avaliação dos parâmetros de Lixiviação de Metais Pesados em Matriz de Cimento Portland por meio da Condutividade Elétrica**. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. 247 f.

VALENTE, M.; VIGNERI, M.; BRESSAN, M.; PASQUALINI, A.; BIANCHINI, S.; LIBERATORE, M. Use of fly ash in concrete: efficiency factors of the supplementary cementing material. In: **Second international conference on sustainable construction materials and Technologies**, Ancona, Italy, 2010. p. 767–76.

VELÁZQUEZ, S. **Aplicaciones del catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) en la preparación de conglomerantes hidráulicos. Estudio de sus propiedades puzolánicas**. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, 2002.

VENÂNCIO, C. **Avaliação das Propriedades Elétricas de Matrizes Cimentícias contendo Metais Pesados**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

WEI, X.; LI, Z. Study on hydration of Portland cement with fly ash using electrical measurement. **Materials and Structures**, London, v. 38, p. 411-417, 2005.

WEI, X.; LI, Z. Early Hydration Process of Portland Cement Paste by Electrical. Measurement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 18, n. 1. p. 99-105, 2006.

WEI, X.; XIAO, L.; LI, Z. Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 31, p. 341–346, 2012.

WONG, H. S., RAZAK, H. A. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 35, n. 4, p. 696- 702, 2005.

YEH, I-CHENG. Modeling Efficiency Factor of Fly Ash in Concrete Using an Unification Approach. **IACSIT International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 5, p. 546-549, 2013.

YILDIRIM, H.; SUMER, M.; AKYUNCU, V.; GURBUZ, E. Comparison on efficiency factors of F and C types of fly ashes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, p. 2939-2947 2011.

ZAHEDI, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 78, p. 354–361, 2015.

ZHU, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, Z.; YAO, Y. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of hydration process and drying shrinkage for cement paste with W/C of 0.25 affected by high range water reducer. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 131, p. 536-541, 2017.