

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 26/07/2018.

**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	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 .....	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	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 .....	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 $R_c$ x $p$ .....	221
9.4.2	Avaliação dos parâmetros de ajuste, erro relativo médio e o coeficiente de determinação ....	222
9.4.3	Curvas Teóricas “ $R_c$ x Consumo de CBC” ajustadas aos dados experimentais.....	223
9.4.4	Avaliação das Curvas Teóricas “ $R_c$ x 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 “ $R_c$ x 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 “ $R_c$ x Consumo de Inerte” ajustadas aos dados experimentais .....	237
9.5.4	Avaliação das curvas teóricas “ $R_c$ x 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 $R_c$ x $a/c$ .....	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 $R_c$ x $a/c$ .....	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 .....**

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 ADIÇÃO 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 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 compostos 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  $\times$  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  $\times$  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.

## 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 Mineraias 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 equivalente 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.