

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO RESÍDUO
PROVENIENTE DAS PORCELANAS DE
ISOLADORES PARA UTILIZAÇÃO EM
CONCRETOS BOMBEÁVEIS ESTRUTURAIS**

FLÁVIO DE LIMA VIEIRA

D0169C17
GOIÂNIA
2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

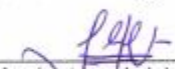
Nome completo do autor: Flávio de Lima Vieira

Título do trabalho: "Estudo da Viabilidade do Resíduo Proveniente das Porcelanas de Isoladores para Utilização em Concretos Bombeáveis Estruturais"

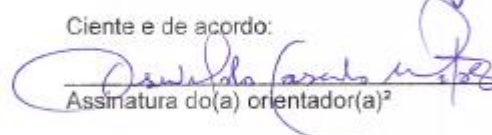
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 26 / 01 / 18

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

FLÁVIO DE LIMA VIEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO RESÍDUO
PROVENIENTE DAS PORCELANAS DE
ISOLADORES PARA UTILIZAÇÃO EM
CONCRETOS BOMBEÁVEIS ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Professor Doutor Oswaldo Cascudo

Co-Orientadora: Prof^a. Dra. Helena Carasek

D0169C17

GOIÂNIA

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Vieira, Flávio de Lima

Estudo da viabilidade do resíduo proveniente das porcelanas de isoladores para utilização em concretos bombeáveis estruturais [manuscrito] / Flávio de Lima Vieira. - 2017.
CXXII, 122 f.

Orientador: Profa. Dra. Oswaldo Cascudo; co-orientadora Dra. Helena Carasek.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental(EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2017.

1. Concreto. 2. Porcelana. 3. Isoladores. 4. Resíduo. 5. Bombeáveis. I. Cascudo, Oswaldo, orient. II. Título.

CDU 624



PPG
GECON

Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil



Ata de N° 0169 da sessão de julgamento da
Dissertação do aluno Flávio de Lima Vieira da
área de concentração Construção Civil do PPG
em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.

Aos 31 dias do mês de agosto de 2017, às 15h00, no Auditório do Centro de Aulas D da UFG reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada "**Estudo da Viabilidade do Resíduo Proveniente das Porcelanas de Isoladores para Utilização em Concretos Bombeáveis Estruturais**", apresentado pelo aluno **Flávio de Lima Vieira**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi Presidida pelo Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (GECON/UFG), sendo como membros a Prof.ª Dr.ª Maria Carolina G. O. Brandstetter (GECON/UFG) e o Prof. Dr. Sérgio Botassi dos Santos (PUC-GO). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

Membro	Instituição	Função	Resultado
Oswaldo Cascudo	GECON/UFG	Presidente	<u>APROVADO</u>
Maria Carolina G. O. Brandstetter	GECON/UFG	Examinadora Interna	<u>APROVADO</u>
Sérgio Botassi dos Santos	PUC-GO	Examinador Externo	<u>APROVADO</u>

Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições**.

Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** do candidato, conforme as seguintes justificativas:


Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo **candidato**.



Maria Carolina G. O. Brandstetter
PPG-GECON/UFG



Sérgio Botassi dos Santos
PUC-GO



Oswaldo Cascudo
PPG-GECON/UFG

Candidato: Flávio de Lima Vieira 

A DEUS e a todos aqueles que confiaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e todas as condições para que eu pudesse desenvolver minhas atividades do mestrado, pois sem isso, não seria possível dar os passos até aqui.

À minha família, em especial minha mãe Iara e avô/mãe Jupira (in memoriam), que sempre me educou com valores voltados para o aprendizado, incentivando na busca do conhecimento.

Aos meu familiares, João Batista, Carlos Eduardo, Amaury, Eliane, Leandro que durante toda minha vida ajudaram a construir meu caráter e serviram de exemplo.

Aos irmãos e irmãs Fernando, Juliano, Guilherme, Tamara e Ticiane, que me servem como inspiração para que eu continue na busca de novas conquistas.

À minha esposa Tatiana e filho Pedro Henrique, que com paciência e amor, me incentivou e aceitou minhas ausências para que eu conseguisse alcançar o propósito.

Aos meus amigos de trabalho Luciana dos Anjos, Eduardo Gambale e Sérgio Botassi que me incentivaram a começar esta empreitada, dando força e acreditando em minha pessoa.

Ao meu orientador Oswaldo Cascudo, que aceitou o desafio juntamente comigo, auxiliando e orientando. A Helena Carasek que muitas vezes me direcionou com ideias importantes para a melhoria do trabalho.

Aos professores do PPG-GECON com os quais tive a oportunidade de fazer disciplinas, Maria Carolina e Marcus Campos, que acrescentaram muito à minha vida profissional e pessoal.

Aos amigos Alexandre de Castro, Geovanne Caetano e Anne Neiry que doaram seus tempos para auxiliar com ideias e correções para melhoria do trabalho.

Aos meus gerentes da empresa Eletrobras Furnas Ricardo André e Renato Cabral que me liberaram para que eu fizesse todas as atividades na Universidade Federal de Goiás e realizasse os experimentos dentro das instalações do laboratório.

Aos colegas de trabalho Ricardo Barbosa, Alfredo Santos Liduário, Marco Aurélio Cupertino, Elizabeth Leopoldina, Carlos Rogério Santana, Moacir Alexandre Andrade, Nicole Hasparik, André Luiz que estiveram comigo durante todo esse período do trabalho.

Aos colaboradores Jésus, Vander, Sílvio, Álvaro, Leandro, Emerson, Gilberto, Aloísio, Edson Martins, Edson, Josean, Solanda e aos inúmeros laboratoristas que com muito suor e dedicação realizaram os ensaios do programa experimental, dando subsídio para minhas análises e dissertação.

A todos que mesmo não mencionados neste texto sou grato, pois reconheço que contribuíram de forma significativa nessa fase da minha vida.

Muito Obrigado!

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein)

RESUMO

A presente pesquisa aborda a temática da destinação do resíduo dos isoladores elétricos proveniente da cadeia geradora de energia elétrica, como as relacionadas às manutenções e ampliações das subestações, unidades geradoras, redes de distribuição, linhas de transmissão e do próprio processo de produção do isolador. No Brasil esta cadeia acumula progressivamente resíduos em pátios e áreas de descarte, e às vezes esses materiais são lançados por terceiros em locais como terrenos baldios, impactando no meio ambiente. Nesse contexto, uma alternativa seria sua utilização para outros fins, os quais, por falta de conhecimento e segurança técnica, ainda se encontram em fases iniciais de estudo. Diante disso, a presente pesquisa propõe a investigação do potencial de uso destas porcelanas no concreto, em substituição aos agregados convencionais e também ao cimento. Para tanto, conduziu-se inicialmente uma caracterização minuciosa do resíduo nas suas diversas dimensões, por meio de análises químicas, físicas e mineralógicas utilizando diferentes métodos, como a difração de raios X e imagens por microscópico eletrônico de varredura, por exemplo. Na sequência foram realizados testes para verificar a estabilidade química do resíduo em argamassa para o desencadeamento de reações álcalis-agregado. Em relação à sua incorporação no concreto, foram realizados ensaios para aferição da resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, abrasão e erosão. As análises foram realizadas em onze concretos estruturais bombeáveis com diferentes teores de substituição, que contemplaram adição de 8% em substituição ao cimento, no agregado miúdo com 50% e 100% de substituição, no agregado graúdo com 45% e 100%, e em algumas composições com substituições simultâneas no miúdo e graúdo. De posse dos resultados, foi traçado um perfil de resistência mecânica, deformabilidade e durabilidade que apresentaram para algumas substituições valores estatisticamente iguais ao concreto sem resíduo, tornando factível a utilização do concreto com porcelana. Eficiências para resistência à compressão variando de 0,087 MPa/kg a 0,107 MPa/kg, módulo de elasticidade com valores de até 38 GPa, são números significativos para as propriedades. Análises da reologia do concreto e impactos no consumo de cimento são aspectos também observados e discutidos no decorrer do trabalho.

Palavras-chave: concreto, porcelana, isolador, resíduo, adição, agregado, resistência.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the techniques for disposal of waste obtained from electrical insulators. These pieces are one of the supplies widely used for electric power generation, and become a waste due to their replacement for new ones after maintenance and expansion works, in places like substations, generating units, distribution networks, transmission lines and its own production process. In Brazil, it is possible to accumulate waste from these insulators in courtyards and waste areas, besides wastelands, impairing the environment. Thus, it is known that an alternative for treatment is needed and the lack of knowledge and technical safe forces the development of researches about this subject, what are still in the beginning. So, this study proposes the evaluation of potential use of such a porcelain in concrete, through the replacement of conventional aggregates and cement. The research was conducted with a careful characterization of the waste in different maximum dimension sizes, with physicochemical and mineralogical analysis obtained from X-Ray diffraction and images from scanning electronic microscopy, for example. Besides, tests of alkali-aggregate reaction were performed in order to assess the chemical stability of the waste in mortar. Regarding to viscoelastic and mechanical properties, the compressive strength, modulus of elasticity, water absorption, and abrasion/erosion were performed. The experimental program considered eleven different mixes of pumped concrete, take into account the following replacement rates: 8% replacement of cement; 50% and 100% replacement of fine aggregate; and 45% and 100% replacement of coarse aggregate. Some mixes were done with both replacement of fine and coarse aggregate. The investigation of mechanical strength, deformation and durability, in conditions aforementioned, demonstrates that concrete with replacement was statistically similar to concrete without any replacement by waste, resulting a suitable concrete with porcelain waste content. The efficiency of compressive strength ranged from 0,087 MPa/kg to 0,107 MPa/kg and the modulus of elasticity reached values up to 38 GPa, indicating expressive results for these properties. Lastly, in research is possible to observe the conclusions about rheological characteristics of all concrete and the influence of these replacement on cement content.

Keywords: concrete, porcelain, insulator, waste, admixture, aggregate, strength.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 – Exemplos de utilização de isoladores no sistema elétrico.....	23
Figura 1.2 – Locais de disposição dos resíduos de isoladores elétricos em Eletrobras Furnas.....	25
Figura 1.3 – Pátio de manutenção da Companhia Energética de Goiás (CELG).....	26

Capítulo 2

Figura 2.1 – Estrutura cristalina da caulinita	31
Figura 2.2 - Estrutura cristalina do coríndon – Esfera vermelha oxigênio e azul alumínio.....	34
Figura 2.3 – Difractogramas de raios X de amostras: a) PR b) GR.....	40
Figura 2.4 – Micrografia apresentando morfologia do pó proveniente da moagem de resíduo cerâmico PR.....	40
Figura 2.5 – Micrografia apresentando morfologia da superfície do resíduo de vaso sanitário. a) Imagem com ampliação de 500x; b) Imagem com ampliação de 1000x; c) Imagem com ampliação de 2000x; d) Intensidade dos espectros obtidos por EDS na amostra.....	41
Figura 2.6 - Valores de resistência à compressão de argamassas utilizando o pó da porcelana como adição (Campos, 2011).....	43
Figura 2.7 – Curvas de evolução da resistência à compressão de concretos com relação água cimento 0,50. (PORTELA <i>et. al.</i> , 2006).....	46
Figura 2.8 – Gráfico de barras para os concretos com substituição do agregado miúdo por resíduo. (CAMPUS, 2009).....	47
Figura 2.9 – Gráfico de barras para os concretos com substituição do agregado graúdo por resíduo. (CAMPUS, 2009).....	48

Figura 2.10 – Gráfico de barras para os concretos com substituição do agregado graúdo por resíduo. (CAMPUS, 2011).....	49
Figura 2.11 – Gráfico de barras para os concretos com substituição nos agregado graúdo e miúdo por resíduo. (CAMPUS, 2011).....	49
Figura 2.12- Valores de resistência à compressão do concreto de A/C 0,60 utilizando resíduo de isoladores em substituição ao agregado graúdo (RIBEIRO <i>et. al.</i> , 2014).....	50
Figura 2.13- Valores de módulo de elasticidade para os concretos com as substituições de 25%, 50%, 75% e 100% de agregado convencional por resíduo no agregado miúdo (CAMPUS, 2009).....	52
Figura 2.14 - Valores de módulo de elasticidade para os concretos com as substituições de 25%, 50%, 75% e 100% de agregado convencional por resíduo no agregado graúdo (CAMPUS, 2009).....	52
Figura 2.15- Valores de módulo de elasticidade para os concretos com as substituições de 10%, 20% e 30% de agregado convencional por resíduo no agregado graúdo (Ribeiro <i>et. al.</i> , 2014).....	53
Figura 2.16- Valores de absorção por água para as diferentes relações água cimento do concreto. (SENTHAMARAI <i>et. al.</i> , 2011).....	54
Figura 2.17- Valores de absorção por água para as diferentes relações água cimento do concreto. (SENTHAMARAI <i>et. al.</i> , 2011).....	57
Figura 2.18- Micrografia e espectrômetro obtidos em M.E.V realizado em amostra de argamassa composito CP II F e resíduo de isoladores aos 91 dias de idade.....	58
Figura 2.19- Micrografia e espectrômetro obtidos em M.E.V realizado em amostra de argamassa composito CP V Ari e resíduo de isoladores aos 91 dias de idade.....	58
Figura 2.20- Resultados do ensaio de reatividade acelerada pela C1260 (ASTM, 1994) realizado para os cimentos CP I, CP IV e CP I + 25% PR.....	59

Capítulo 3

Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	60
Figura 3.2 – Fluxograma contendo a disposição geral do experimento.....	61
Figura 3.3 - Processamento do resíduo para suas diferentes implantações no concreto.....	63

Capítulo 4

Figura 4.1 - Difratograma de raios X da amostra utilizada na pesquisa.....	76
Figura 4.2 - Micrografia destacando uma superfície muito lisa e vitrificada, com EDS da parte esmaltada do resíduo.....	77
Figura 4.3 - Micrografia e EDS da parte transição entre o esmalte e a parte interna do resíduo.....	77
Figura 4.4 - Micrografia (a) do agregado e (b) do pó do resíduo.....	78
Figura 4.5 - Expansões dos cimentos em combinação com resíduos de diferentes pontos de coleta.....	79
Figura 4.6 - Micrografia do concreto – (a) ZT do concreto referência; (b) ZT do concreto utilizando o resíduo como agregado; (c) ancoragem da pasta no agregado artificial.....	80
Figura 4.7 - Valores obtidos dos ensaios de abatimento tronco de cone e teor de ar das diferentes dosagens produzidas.....	82
Figura 4.8 - Valores obtidos dos ensaios de reometria realizados nos diferentes concretos para verificação do padrão reológico.....	83
Figura 4.9 - Estimativa de média global dos valores de resistência à compressão e desvio padrão, ressaltando os agrupamentos pelo teste de Duncan.....	86
Figura 4.10 - Médias das resistências à compressão dos concretos com o desvio padrão para cada idade.....	87
Figura 4.11 - Média global dos valores de módulo de elasticidade, com desvio padrão, para cada tipo de concreto, mostrando os resultados de agrupamento pelo teste de Duncan.....	91
Figura 4.12 - Regressão linear do comportamento dos concretos quanto ao volume de agregado <i>versus</i> o módulo de elasticidade.....	93
Figura 4.13 - Estimativa de média global dos valores de módulo de elasticidade, com seu desvio padrão, por idade.....	94
Figura 4.14 - Valores estimados por diversas normas e os respectivos pontos de módulo de elasticidade obtidos pelo experimento.....	95

Figura 4.15 - Média global dos valores de absorção, com seu desvio padrão, para cada tipo de concreto. As linhas tracejadas separam estatisticamente grupos diferentes, pelo teste de Duncan.....	96
Figura 4.16 - Gráfico comparativo entre resistência à compressão e absorção de água.....	97
Figura 4.17 - Médias dos resultados de abrasão-erosão obtidos para os concretos ensaiados por idade.....	98
Figura 4.18 - Gráfico comparativo entre resistência à compressão e abrasão-erosão.....	99

Anexo B

Figura B-1 - Gráfico das expansões pela idade de ensaio – Cimento Padrão.....	119
Figura B-2 - Gráfico das expansões dos cimentos compostos com o pó do resíduo.....	120

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1 – Cadeia de geração do resíduo proveniente das porcelanas.....	27
---	----

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Análise química das matérias-primas utilizadas na fabricação das porcelanas (Bonetti et. al., 2009).....	32
Tabela 2.2 - Fases cristalinas identificadas na difração de raios X (Bonetti et. al., 2009).....	33
Tabela 2.3 - Análise química de resíduos cerâmicos proveniente de argilas brancas.....	39
Tabela 2.4 – Índice de atividade pozolânica com resíduo cerâmico – EN 450-1 (UNE, 2013).....	42
Tabela 2.5 – Resistência à compressão com resíduo cerâmico – EN 197-1 (UNE, 2011).....	43
Tabela 2.6 – Resistência à compressão do concreto com e sem resíduo.....	45
Tabela 2.7 – Tabela explicativa da legenda da Figura 2.7.....	46
Tabela 2.8 – Valores de módulo de elasticidade para concretos com substituição do agregado graúdo por resíduo de porcelana de isoladores. Relação água cimento variando de 0,35 a 0,60.....	51

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Caracterização físico-química das amostras do resíduo em pó.....	64
Tabela 3.2 - Requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014).....	66
Tabela 3.3 - Caracterização física da areia.....	66
Tabela 3.4 – Caracterização física da brita de 25 mm.....	67
Tabela 3.5 - Caracterização físico-química do cimento CP IV 32.....	68
Tabela 3.6 – Dosagens utilizadas na pesquisa.....	69
Tabela 3.7 – Dosagens utilizadas na pesquisa (continuação).....	70

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Valores médios de resistência à compressão.....	84
Tabela 4.2 – Análise de variância realizada com os dados individuais de resistência à compressão.....	85
Tabela 4.3 – Avaliação da eficiência dos concretos em função do consumo de cimento.....	88
Tabela 4.4 – Valores médios de módulo de elasticidade.....	90
Tabela 4.5 - Análise de variância realizada com os dados individuais de módulo de elasticidade.....	90
Tabela 4.6 – Valores médios de percentual de absorção de água.....	95
Tabela 4.7 - Análise de variância realizada com os dados individuais de absorção de água, para os fatores considerados no modelo estatístico.....	96

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Cadeia de geração do resíduo proveniente das porcelanas de isoladores elétricos.....	101
---	-----

Anexo A

Tabela A-1 - Traço e Resistência à compressão de argamassas para avaliação da melhor composição entre areias.....	116
Tabela A-2 - Resistência à compressão de argamassas com a/c 0,48.....	117

Anexo B

Tabela B-1 - Composição química dos álcalis do cimento padrão.....	120
--	-----

Anexo C

Tabela C-1 – Resultados individuais dos ensaios da pesquisa.....	122
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM - Associação Brasileira da Cerâmica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica

ACI – *American Concrete Institute* (Instituto Americano do Concreto)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PPG – GECON – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

NBR – Normatização Brasileira

RAA – Reação álcali-agregado

RCC – Resíduo da Construção Civil

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	22
1.2. JUSTIFICATIVA	25
1.3. OBJETIVOS	28
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	28
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	30
2.1. RESÍDUO CERÂMICO DA PORCELANA DOS ISOLADORES	30
2.1.1. Porcelanas – Matérias-primas e constituições mineralógicas.....	30
2.1.2. Isoladores elétricos – Conceito e processo de produção	34
2.2. RESÍDUO CERÂMICO INCORPORADO AO CONCRETO.....	37
2.2.1. Caracterização físico-química	37
2.2.1 Resíduo cerâmico empregado como adição mineral ao concreto.....	42
2.2.2. Resíduo cerâmico empregado como agregado ao concreto.....	45
2.2.2.1. Resistência à compressão	45
2.2.2.2. Módulo de Elasticidade.....	50
2.2.2.3. Absorção por água.....	53
2.2.2.4. Abrasão-erosão.....	54
2.3. REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO PROVENIENTE DO RESÍDUO DO MATERIAL CERÂMICO NO CONCRETO	55
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
3.1. VARIÁVEIS DA PESQUISA E DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO.....	60
3.2. MATERIAIS CONSTITUINTES E CONCRETOS ESTUDADOS.....	63
3.2.1. Resíduos das porcelanas	63

3.2.2. Agregado miúdo	66
3.2.3. Agregado graúdo.....	67
3.2.4. Cimento Portland	67
3.2.5. Concretos produzidos	69
3.3. MÉTODOS EMPREGADOS	70
3.3.1 Métodos de caracterização especial do resíduo	70
3.3.1.1 Difração de raio X	71
3.3.1.2 Índice de atividade pozolânica – Chapèlle modificado	71
3.3.1.3 Reatividade álcali-agregado pelo método acelerado	72
3.3.1.4 Análise por microscopia eletrônica de varredura	72
3.3.2 Métodos de avaliação dos concretos.....	72
3.3.2.1 Caracterização reológica do concreto fresco	73
3.3.2.2 Resistência à compressão	73
3.3.2.3 Módulo de elasticidade.....	73
3.3.2.4 Absorção de água.....	73
3.3.2.5 Abrasão-erosão	73
3.3.2.6 Análise estatística dos resultados	74
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO.....	75
4.1.1 Difração de raios X.....	75
4.1.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura	76
4.1.3 Reatividade álcali-agregado pelo método acelerado.....	78
4.2. RESULTADOS DO CONCRETO	80
4.2.1 Análise da microestrutura do concreto por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	80
4.2.2 Propriedades do concreto no estado fresco.....	81

4.2.3 Resistência à compressão do concreto	84
4.2.4 Módulo de Elasticidade	89
4.2.5 Absorção de Água.....	95
4.2.6 Abrasão-erosão	98
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.1. CONCLUSÕES	101
5.1.1 Caracterização físico-química dos resíduos.....	101
5.1.2 Propriedades do concreto fresco	104
5.1.3 Propriedades do concreto endurecido	105
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	107
REFERÊNCIAS	108
ANEXO A	115
Determinação do melhor percentual de agregados natural/resíduo.....	115
ANEXO B	118
Ensaio complementares.....	118
Reatividade álcalis-agregado pelo método acelerado.....	118
ANEXO C	121
Resultados individuais dos ensaios da pesquisa.....	121

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita uma contextualização do tema, apresentando-se um panorama político e econômico da produção dos isoladores e, por conseguinte, do descarte destes materiais. Na justificativa do tema é possível entender o que motivou a pesquisa e, posteriormente, são expostos os objetivos e a estruturação da dissertação.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E ORIGEM DO RESÍDUO

O sistema elétrico brasileiro é muito extenso, proporcional às extensões do país, sendo composto no total de 4687 empreendimentos em operação de geração, totalizando 153 374 888 kW de potência instalada e 32 empresas de distribuição, com mais de 400 000 consumidores, conforme levantamentos da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) de maio de 2016 e 2017. Levantamentos da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) de 2013, já registravam aproximadamente 117 000 km de linha de transmissão de diversas tensões.

Toda a estrutura do parque de geração e distribuição de energia elétrica no Brasil necessita de uma constante manutenção do sistema, como também de uma constante ampliação para atender o crescimento da economia e gerar um incremento no PIB nacional. Do resíduo advindo desse processo do sistema elétrico, tem-se um percentual representativo composto de material cerâmico, como é o caso das porcelanas dos isoladores elétricos.

Essas porcelanas são encontradas em postes, subestações, hidrelétricas, torres de transmissão, sendo que a função normalmente é de isolamento e proteção contra fuga e descarga elétrica do sistema para as estruturas, pessoas e profissionais envolvidos. As dimensões, espessura do corpo do isolador e composição são diretamente proporcionais ao isolamento necessário para a voltagem da rede (MAMEDE FILHO, 1994). Na Figura 1.1, é possível observar os diferentes locais onde pode ser vista a utilização desse material.

Brito (1999) e Carneiro (2000) observaram um percentual representativo de material cerâmico nos resíduos de construção civil urbano, como de tijolos, vasos sanitários, revestimentos, no percentual de 33% em São Paulo e 15% em Salvador. Com essa proporção de materiais

cerâmicos, resultante de diferentes processos industriais e de diferentes características, faz-se necessário estudos para uma correta destinação, como também para aqueles resíduos resultantes de outras cadeias geradoras, como do setor elétrico.

Figura 1.1 - Exemplos de utilização de isoladores no sistema elétrico



A preocupação com a melhoria do gerenciamento de resíduos sólidos gerados pelo setor da indústria advém do surgimento da consciência ambiental e da preocupação com as matérias-primas não renováveis. Neste ambiente no qual surgiram na comunidade de pesquisadores, trabalhos como os de Pinto (1999), Miranda (2000; 2005), Angulo (2005), Debieb (2008), Rashid *et al.* (2009), Cachim (2009), Ulsen (2011) e Jiménez *et al.* (2013), que estudaram as possibilidades de reaproveitamento do resíduo dentro da própria indústria da construção civil, também houve o interesse em pesquisas buscando dar destinação para outros tipos de resíduo da indústria, como as porcelanas de isoladores. Juntamente com os avanços da cadeia científica, foram surgindo leis e regulamentações como a Lei Federal nº 10.257 (BRASIL,

2001), promulgada em 10/07/2001, que criou o Estatuto das Cidades e determinou novas e importantes diretrizes para o desenvolvimento sustentado dos aglomerados urbanos no país, a Resolução nº 307 (BRASIL, 2002), aprovada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Posteriormente foi sancionada a Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e a Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010), que incorpora as definições da resolução nº 307 na estrutura de regras para o saneamento, instituindo a política nacional de resíduos sólidos.

As pesquisas em andamento e a criação de regulamentações voltadas para a destinação de resíduos da indústria da construção formaram ambientes propícios para que se buscasse estudar outros materiais descartados do processo, como a porcelana de isoladores elétricos. Com isso, resíduos cerâmicos provenientes de argilas brancas, como as porcelanas dos vasos sanitários, revestimentos cerâmicos e porcelanas de isoladores elétricos despertaram interesse de diversas pesquisas no decorrer dos anos (SOUZA SANTOS, 1992; FRANK *et al.*, 2004; MARTINS; BALDO, 2004a; SENTHAMARAI; DEVADAS; MANOHARAN, 2005; SANTOLAIA *et al.*, 2007; COSTA; GUERRA *et al.*, 2009, 2013; CAMPUS, 2009, 2011; ANDREOLA *et al.*, 2010; PACHECO-TORGAL, 2010; MEDINA *et al.*, 2012; RIBEIRO *et al.*, 2014).

Dessa forma, faz-se necessária uma consolidação científica para que a utilização da porcelana dos isoladores como material reciclado do resíduo do setor elétrico seja confiável, conhecendo o potencial de contaminação, as qualidades e potenciais de utilização. Enfatiza-se que para isso, devem-se considerar algumas particularidades, como o estudo de uma possível variabilidade das propriedades dos resíduos de porcelana no que tange, por exemplo, à sua absorção, massa específica e granulometria, propriedades estas que podem inviabilizar uma possível utilização do material em concretos estruturais, fato observado em alguns resíduos (ÂNGULO, 1999).

A inexistência de parâmetros normativos específicos para os resíduos de porcelanas corrobora para a utilização de normas voltadas para o resíduo da construção civil, na tentativa de classificá-los. No que diz respeito à normalização, Kiouranis, Miranda e Melo Neto (2016) realizaram uma análise comparativa entre diversas normas, apresentando a compilação de seus principais parâmetros e valores limites, os quais apresentaram uma grande variação, provavelmente devido à evolução na cadeia de coleta, separação e beneficiamento dos

resíduos, assim como em função de pesquisas relacionadas ao tema dentro dos países normatizados sobre o assunto. Uma observação importante encontrada foi com respeito à parametrização da densidade do concreto e absorção de água dos agregados, propriedades relacionadas à porosidade do concreto, e que influenciam a capacidade mecânica e de durabilidade do material. Salienta-se que a norma brasileira que trata sobre esse tipo de resíduo, a NBR 15116 (ABNT, 2004), não estabelece valores para densidade mínima e não limita o percentual de substituição do agregado convencional, contudo se atém somente a concretos não estruturais.

1.2. JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa surgiu de observações realizadas na empresa Eletrobras Furnas, onde foi identificado um passivo de resíduos de isoladores elétricos acumulados ao longo do tempo, resultante de manutenções e processos de modernização de equipamentos do parque de geração e transmissão de energia. Hoje, tem-se a presença desse resíduo como material descartado em vários pátios de subestações e usinas hidrelétricas da empresa, conforme pode ser observado na Figura 1.2.

Figura 1.2 - Locais de disposição dos resíduos de isoladores elétricos na Eletrobras Furnas

(a) Resíduo de isoladores em Tijuco Preto



(b) Isoladores substituídos em Foz do Iguaçu



(c) Resíduo de isoladores em Campinas



(d) Resíduos de manutenção em Campinas



Estabelecendo-se um quantitativo nacional da empresa Eletrobras Furnas, tem-se nas unidades de coleta e armazenamento de Tijuco Preto, Foz do Iguaçu e Campinas, cerca de 71,5 toneladas de material nos pátios aguardando descarte, com uma estimativa de geração de 50 toneladas de resíduo por ano, conforme levantamentos na própria empresa.

O que poderia ser um problema pontual da empresa se repete em várias instituições, como foi também observado em um levantamento realizado na concessionária de energia do Estado de Goiás (CELG), em que se observou um passivo de, aproximadamente, 100 toneladas de resíduo advindos de todo o estado, resultante do acúmulo de 2 anos, conforme se pode ver na ilustração da Figura 1.3. O ritmo de descarte está relacionado ao valor investido na manutenção das redes por ano, sendo este montante fruto de uma campanha de manutenção para compensar anos anteriores deficitários. A média normal de descarte de isoladores é da ordem de 20 a 25 toneladas por ano.

Figura 1.3 - Pátio de manutenção da Companhia Energética de Goiás (CELG)



Na literatura são apresentados outros exemplos, como o de Campos (2009), que apresenta duas fontes geradoras de resíduo: uma que se origina das unidades defeituosas nas fábricas de produção dos isoladores e outra oriunda das manutenções do sistema. Para o primeiro caso, a produção anual brasileira de isoladores elétricos de porcelana é da ordem de 30 000 toneladas, conforme levantamentos da Associação Brasileira da Cerâmica (ABCERAM, 2016), sendo que somente a perda de material fica em torno de 5% a 10% do total produzido. Além desta perda, há os isoladores inservíveis, cujo descarte pela concessionária elétrica da região de Campinas-SP, por exemplo, gira em torno de 25 toneladas ao mês. Todo esse material é descartado no lixo, segundo dados da própria concessionária.

Portella *et al.* (2006) fizeram uma projeção de 11 toneladas de resíduos de isoladores para os 160 000 km de linhas de distribuição para o Estado do Paraná. Projetando para as 32 empresas de distribuição, o passivo seria de 352 toneladas de porcelanas sem destinação.

Tendo em vista os problemas levantados em diversas empresas e os observados por pesquisadores como Portella *et al.* (2006), somados ao potencial das porcelanas quando se observam os valores obtidos na caracterização, como alta resistência mecânica à compressão, a qual varia de 50 MPa a 140 MPa, dependendo da classe dos isoladores, e uma massa específica da ordem de 2,2 g/cm³ a 2,5 g/cm³ (BONETTI *et al.*, 2009), tudo isso sugere questões que motivam e credenciam uma pesquisa do resíduo para uma possível substituição ao agregado convencional de concretos.

Na Tabela 1.1 é apresentada a cadeia de geração potencial de resíduo de porcelanas no Brasil, na qual é possível constatar que existe uma vasta rede de empresas e linhas de transmissão, que com a correta destinação dos resíduos poderá contribuir para diminuição da utilização de recursos naturais não renováveis, diminuindo assim os milhões de agregados convencionais produzidos no Brasil para consumo na construção civil (LA SERNA; RESENDE, 2013).

Tabela 1.1 – Cadeia de geração do resíduo proveniente das porcelanas dos isoladores elétricos

Sistema gerador de resíduos	
Empresas de distribuição (un)	32
Unidades geradoras (un)	4687
Unidades geradoras em construção (un)	258
Linha de transmissão (km)	117 000
Fábrica dos isoladores (un)	6

Além da contribuição para a consolidação do conhecimento dos efeitos das porcelanas na matriz cimentícia, averiguando as qualidades, potencialidades e possíveis patologias com a introdução desse material no concreto, verifica-se também se os concretos obtidos têm propriedades de um concreto estrutural. A presente pesquisa se justificativa, ainda, por sugerir uma destinação ao resíduo, problema identificado em várias empresas, que possuem o acúmulo desse material em seus pátios, além de se evitar seu lançamento em locais impróprios, como em zonas rurais e terrenos baldios.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é verificar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de porcelana como insumo incorporado ao concreto bombeável com potencial para produção e aplicações em estruturas.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- caracterizar química e morfológicamente o resíduo das porcelanas;
- analisar a possibilidade de utilização do resíduo, na forma de pó, como material pozolânico ou fíler no concreto;
- verificar se o material não tem potencial reativo quanto à reação álcali-agregado;
- verificar se o resíduo atende a classificação da NBR 15116 (ABNT, 2004);
- estudar as propriedades mecânicas, elásticas, de absorção de água, abrasão-erosão, para verificação se atende os parâmetros para um concreto com propriedades reológicas de aplicação estrutural.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente capítulo apresenta uma introdução ao tema da dissertação, com um breve comentário sobre o setor elétrico e as fontes que originam o resíduo, passando pela conceituação de isolador elétrico, e finalizando com a evolução das leis, normativas e pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento da matéria. Subsequentemente, tem-

se a justificativa que motivou esta pesquisa. Por fim, são apresentados os objetivos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo tem-se a revisão da literatura com o objetivo de entender as propriedades físicas e químicas da microestrutura e macroestrutura dos isoladores para o conhecimento das propriedades do próprio material e do comportamento dele quando incorporado na matriz cimentícia. Também se apresenta uma revisão de trabalhos realizados por diversos autores utilizando resíduo de porcelana de isoladores e outros resíduos similares compondo o concreto, focando na caracterização físico-química, resistência á compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, abrasão-erosão e reatividade álcalis-agregado.

No terceiro capítulo é detalhado todo programa experimental com a apresentação das caracterizações físico-química dos materiais envolvidos e os métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

No quarto capítulo estão os resultados e discussões dos valores obtidos dos ensaios utilizados na metodologia adotada no programa experimental para todas as propriedades propostas, como relativo aos ensaios especiais de caracterização físico-química do resíduo e os referentes as propriedades do concreto fresco e endurecido.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais, onde é possível verificar as contribuições da pesquisa para a utilização do concreto com incorporação do resíduo das porcelanas dos isoladores, determinando os pontos positivos e negativos deste compósito.

Por fim, são apresentadas todas as referências utilizadas para o desenvolvimento desta dissertação e logo em seguida os anexos que complementam as informações necessárias ao entendimento da pesquisa.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura abordará alguns estudos em que se utilizou o resíduo cerâmico incorporado no concreto e em assuntos correlatos que ajudarão a entender o potencial deste resíduo como material integrante do concreto.

2.1. RESÍDUO CERÂMICO DA PORCELANA DOS ISOLADORES

O resíduo cerâmico é proveniente do descarte de isoladores, que têm na sua fabricação à utilização de três matérias básicas: cerâmica, vidro e fibra, conforme descreve Mamede Filho (2005). Os isoladores pesquisados são provenientes de material cerâmico. Van Vlack (1984) conceitua materiais cerâmicos como fases que contém compostos de elementos metálicos e não-metálicos, sendo muita as possíveis combinações entre eles.

2.1.1. Porcelanas – Matérias-primas e constituições mineralógicas

Souza Santos (1992) intitulam os isoladores elétricos como porcelanas, que é produzida a partir de uma massa constituída por caulim, argila, quartzo e feldspato potássico. Esse grupo de materiais cerâmicos recebe o nome genérico de cerâmica branca, devido às cores de tonalidade claras das massas cerâmicas utilizadas, mesmo quando são cobertas por esmaltes coloridos (vidros opacos ou transparentes, com pigmentos coloridos) para dar uma impermeabilização superficial à microporosidade dessas massas, sendo que algumas massas de cerâmica branca podem ser fabricadas com total vitrificação, isto é, sem porosidade aparente.

A argila constituinte da matéria-prima é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade. Todas as argilas são constituídas por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos por argilominerais.

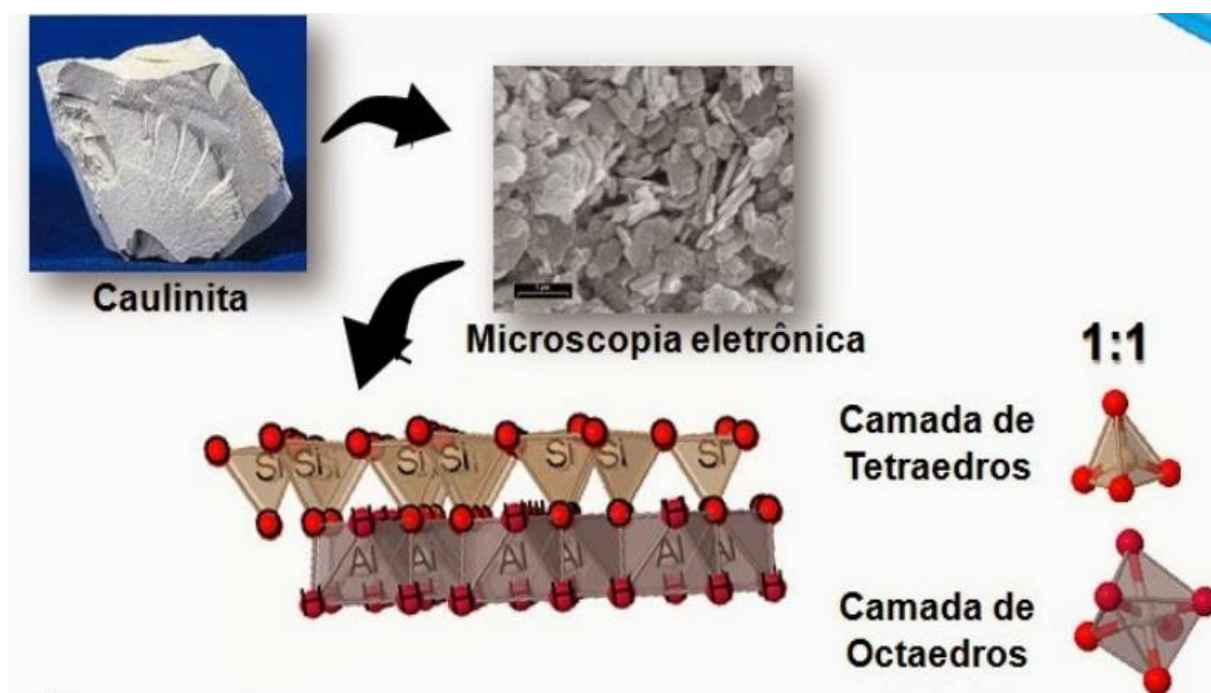
Uma argila qualquer pode ser composta por partículas de um argilomineral ou por uma mistura de diversos. Quimicamente são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo ainda, geralmente, certo teor de elementos alcalinos e alcalinos terrosos. As

argilas podem ter além dos argilominerais, matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros (SOUZA SANTOS, 1992).

Para utilização na cerâmica branca, três são os tipos de argilas utilizadas: caulins, argilas plásticas e filitos cerâmicos, que podem ou não conter materiais fundentes. Os caulins são constituídos de quartzo, mica moscovita, caulinita bem ou mal cristalizada. A constituição está em função da formação da jazida. As argilas plásticas são geralmente cauliniticas, às vezes contendo gibsita, mica, quartzo e outros argilominerais como a illita e a montomrilonita. Os filitos cerâmicos são oriundos da decomposição de rochas metamórficas, sendo constituídos de uma mistura de caulinita, mica moscovita e quartzo, mas contendo um percentual de óxidos de potássio e de sódio entre 3% a 5%.

Na Figura 2.1 vê-se a estrutura do argilomineral caulinita que ocorre pelo empilhamento regular de camadas 1:1 em que cada camada consiste de uma folha de tetraedros de SiO_4 e uma folha de octaedros de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, também chamada de folha de gibsita, ligadas entre si em uma única camada, através de átomos de oxigênio em comum, gerando assim uma estrutura fortemente polar. A fórmula estrutural da célula unitária é $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ e sua composição percentual de sílica, alumina e água é a seguinte: SiO_2 – 46,54%, Al_2O_3 – 39,50% e H_2O – 13,96% (SOUZA SANTOS, 1992).

Figura 2.1- –Estrutura cristalina da caulinita (Fonte: <http://mineralogiaequimicadosolo.blogspot.com.br>)



O feldspato, outro mineral constituinte da estrutura dos isoladores cerâmicos, é o termo que cobre uma série de alumino-silicatos alcalinos ou alcalinos terrosos. Os feldspatos naturais são normalmente uma mistura em diversas proporções de alumino-silicatos de potássio, de sódio, de cálcio, de lítio e ocasionalmente de bário e de cério. Para a indústria cerâmica os feldspatos de maior importância são o potássico ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) e o sódico ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), por terem temperatura de fusão relativamente baixa e dessa forma, podendo ser empregados como geradores de “massa vítrea” nas massas cerâmicas e nos vidrados. No entanto eles dificilmente são encontrados puros, em geral apresentam-se em mistura, podendo também estar associados a outras impurezas (ABCERAM, 2016).

Bonetti *et. al.* (2009) em estudos para fabricação de isoladores elétricos, caracterizou diversas matérias-primas utilizadas nas misturas das massas de porcelana cerâmica. Na Tabela 2.1 estão os compostos presentes nas amostras das matérias-primas ensaiadas e o percentual obtido na análise química.

Tabela 2.1 - Análise química das matérias-primas utilizadas na fabricação das porcelanas (Bonetti *et. al.*, 2009)

Matéria-prima	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	P.fogo
Argila A	62,36	21,76	0,14	3,80	1,08	2,41	0,05	0,15	0,02	0,98	7,25
Argila B	50,57	31,90	0,10	0,76	0,06	1,93	0,07	0,10	0,02	1,47	13,01
Argila C	65,41	22,12	0,11	1,76	0,18	1,45	0,05	0,03	0,03	1,10	7,75
Caulim A	45,94	39,01	0,10	0,56	0,00	0,25	0,07	0,12	0,01	0,03	13,93
Caulim B	46,28	37,84	0,11	0,18	0,00	1,25	0,20	0,01	0,02	0,18	13,90
Caulim C	65,46	22,35	0,09	2,09	0,17	1,31	0,05	0,09	0,02	0,86	7,51
Feldspato	65,41	19,40	4,40	9,34	0,00	0,03	0,20	0,52	0,02	0,02	0,65
Nefelina	57,85	22,92	11,20	5,69	0,01	0,60	0,27	0,04	0,25	0,10	1,09
Quartzo	92,10	5,15	0,12	0,46	0,13	0,19	0,05	0,03	0,01	0,18	1,60
Argila sinterizada	29,80	65,00	0,00	0,58	0,00	1,81	0,05	0,00	0,00	2,75	0,00
Bauxita calcinada	9,40	84,00	0,20	0,20	0,20	1,80	0,20	0,00	0,00	4,00	0,00

Os compostos observados nas análises químicas fazem parte das estruturas cristalinas apresentadas na Tabela 2.2, identificadas através de difração de raios X.

Tabela 2.2 - Fases cristalinas identificadas na difração de raios X (Bonetti et. al., 2009)

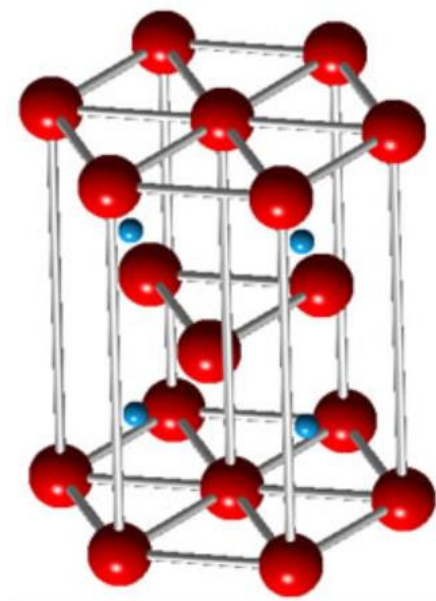
Matérias-primas	Fases
Argila A	Quartzo - Caulinita - Muscovita
Argila B	Quartzo - Caulinita
Argila C	Quartzo - Caulinita - Hematita
Caulim A	Quartzo - Caulinita - Haloisita
Caulim B	Quartzo - Caulinita - Haloisita
Caulima C	Quartzo - Caulinita - Haloisita
Feldspato	Quartzo - Ortoclásio - Albita
Nefelina	Albita - Nefelina
Quartzo	Quartzo
Argila sinterizada	Corindon - Mulita - Hematita
Bauxita calcinada	Corindon - Mulita - Hematita

Foram identificados o quartzo, coríndon e outros argilominerais além da caulinita, como por exemplo a muscovita. O quartzo é polimórfico da sílica, podendo ainda existir vários arranjos estruturais para uma mesma combinação de SiO_2 , como por exemplo a forma cristalina de cristobalita e a tridimita. O quartzo é um material considerado termodinamicamente estável, mas dependendo de como ocorreu a formação esse mineral pode se tornar reativo (CASCUDO, CARASEK E HASPARYK, 2010). O aparecimento de quartzo, cristobalita ou tridimita está relacionado ao patamar de temperatura alcançado, sendo que para temperaturas mais elevadas há o aparecimento da cristobalita e tridimita (BONETTI, 2009).

O quartzo, cristobalita e a tridimita são da família dos silicatos, que tem como características por possuírem uma unidade fundamental de tetraedro SiO_4 . Devido as características de estabilidade estrutural do quartzo, o mesmo desempenha a propriedade na porcelana de tornar o material refratário.

O coríndon possui uma estrutura de forma hexagonal fortemente empacotada (Figura 2.2), uma das formas da alumina Al_2O_3 com propriedades refratária, isolante elétrica e tem características abrasivas (CASCUDO, CARASEK E HASPARYK, 2010). Van Vlack apresenta Al_2O_3 como um composto binário de distância interatômica de apenas 0,191 nm separando as cargas iônicas do alumínio e seus seis oxigênios vizinhos, provocando com isso uma surpreendente ligação, refletindo em altas temperaturas de fusão ($>2000^\circ\text{C}$), na dureza, na resistência química, baixa condutividade elétrica e relativamente alta condutividade térmica.

Figura 2.2 - Estrutura cristalina do coríndon – Esfera vermelha oxigênio e azul alumínio (Fonte: <http://www.e-agps.info/angelus/cap8/>)



O coríndon é encontrado dentro da bauxita, que é um minério composto principalmente de hidróxido de alumínio e possui o papel de melhorar as propriedades mecânicas da porcelana (BONETTI, 2009)

2.1.2. Isoladores elétricos – Conceito e processo de produção

Bonetti (2009) caracteriza os isoladores como materiais cerâmicos do tipo porcelana, nos quais as ligações químicas predominantes são iônicas e covalentes. Essas ligações fortes conferem aos materiais cerâmicos elevado módulo de elasticidade, elevadas dureza, resistência química e temperatura de fusão, além de baixa expansão térmica. Ao contrário dos metais, os materiais cerâmicos não possuem elétrons livres, apresentando assim propriedades elétricas e térmicas favoráveis à sua utilização para a fabricação de isoladores elétricos. Tais propriedades, neste caso, estão relacionadas às características e propriedades intrínsecas das matérias-primas, bem como ao processo de queima e obtenção do produto cerâmico, como comentado anteriormente.

A tecnologia de fabricação de isoladores elétricos foi desenvolvida no começo do século passado utilizando-se composições tradicionais de porcelana quartzosa. A partir de 1940, iniciou-se o estudo da substituição do quartzo pela alumina para melhorar o desempenho dos isoladores, principalmente quanto às suas propriedades mecânicas. As massas aluminosas,

apesar do maior custo de fabricação, possuem melhores propriedades mecânicas e por esta razão são utilizadas para a fabricação de isoladores de grande porte.

Para a produção dos isoladores a massa cerâmica passa por um processamento a elevadas temperaturas no qual ocorre uma mudança na composição química, na estrutura cristalina e no arranjo das diversas fases componentes, provocando com isso ganho em propriedades importantes. Os materiais cerâmicos processados são, portanto, constituídos por uma fase vítrea, e por uma fase cristalina que se apresentam como cristais únicos ou como aglomerados de cristais de diversas formas e dimensões, ou por um sistema composto por vidros e cristais, podendo conter metais ou altos polímeros substituindo total ou parcialmente a fase vítrea (SOUZA SANTOS, 1992)

As principais etapas no processamento dos isoladores cerâmicos podem ser agrupadas da seguinte forma: preparação das matérias-primas: conformação e fabricação; processamento térmico, acabamento e esmaltação. A seguir, têm-se algumas informações sobre essas etapas.

Preparação das matérias-primas – A preparação ou tratamento da matéria-prima compreende toda operação, de maneira geral, que precedem a fabricação propriamente dita dos produtos cerâmicos, que são a conformação, tratamento térmico e acabamento (PETRUCCI, 1982).

O tratamento compreende todos os processos de depuração, divisão, homogeneização e obtenção da umidade adequada da matéria-prima. A depuração consiste na eliminação de impurezas que possam prejudicar o material, tais como: grãos duros, sais solúveis, nódulos de cal. A divisão é uma etapa que requer trituração e moagem para que as operações posteriores possam realizar em um ambiente de condições melhores para as transformações térmicas e químicas. A homogeneização e umidificação são processos realizados na presença de água para permitir uma mistura íntima das matérias-primas e com a quantidade de água necessária, pois a água será retirada posteriormente do sistema (PETRUCCI, 1982).

Conformação – A Abceram cita como métodos de conformação: colagem ou fundição, prensagem, extrusão e torneamento.

Para os isoladores a conformação é normalmente realizada por extrusão que consiste da introdução da massa cerâmica dentro de uma extrusora, também conhecida como maromba, onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de bocal com determinado formato. Como resultado obtém-se uma coluna extrudada, com seção transversal

com o formato e dimensões desejadas. Após a extrusão os isoladores passam pelo torneamento, realizada em tornos mecânicos ou manuais, onde a peça adquire seu formato final (CAMPOS, 2009; ABCERAM, 2014).

Tratamento térmico - Nesta operação, conhecida também por sinterização, os produtos adquirem suas propriedades finais. As peças, após secagem, são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se em torno de 1300 °C, em fornos contínuos ou intermitentes. Durante este tratamento ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações (CAMPOS, 2009; ABCERAM, 2014).

Acabamento – Tratamento final de uma peça de isolador cerâmico para torná-lo utilizável para uma finalidade específica. Alguns produtos requerem processamento adicional para atender a algumas características, não possíveis de serem obtidas durante o processo de fabricação. O processamento pós-queima recebe o nome genérico de acabamento e pode incluir polimento, corte, furação, entre outros.

Esmaltação – Esmaltes ou vidrados são misturas de matérias-primas naturais e produtos químicos ou compostos vítreos que aplicados à superfície do corpo cerâmico e após queima, formam uma camada vítrea, delgada e contínua. Esta camada tem por finalidade aprimorar a estética, tornar o produto impermeável, melhorar a resistência mecânica e propriedades elétricas entre outros fatores. As composições dos esmaltes (vidrados) são inúmeras e sua formulação depende das características do corpo cerâmico, das características finais do esmalte e da temperatura de queima. Os esmaltes são obtidos a partir de matérias-primas naturais e de produtos da indústria química. Entre os minerais constituintes dos esmaltes estão o quartzo, quartzito, caulinita, lepidolita, espodumênio, ambligorita, feldspato, calcita, fluorita, talco, dolomita e zirconita. Entre os produtos químicos têm-se: borax (borato de sódio), ácido bórico, carbonato de sódio, nitrato de sódio, carbonato de potássio, nitrato de potássio, óxidos de chumbo, carbonato de cálcio, carbonato de bário, carbonato de magnésio, carbonato de lítio, carbonato de estrôncio e óxido de zinco (ABCERAM, 2014)

O esmalte cru, um tipo de esmalte utilizados em porcelanas, constituem-se de uma mistura de matérias-primas numa granulometria bastante fina, que é aplicada, na forma de suspensão, à superfície da peça cerâmica. Na operação de queima a mistura se funde e adere ao corpo cerâmico, adquirindo o aspecto vítreo durante o resfriamento. Esse tipo de vidrado é aplicado em peças que são queimadas em temperaturas superiores a 1200 °C. E para conferir coloração aos esmaltes, são adicionados materiais denominados corantes. A formação da cor nos materiais vítreos pode ocorrer por solução de íons cromóforos, geralmente, metais do grupo de transição (Cr, Cu, Fe, Co, Ni, Mn, U e V).

2.2. RESÍDUO CERÂMICO INCORPORADO AO CONCRETO

Os resíduos cerâmicos despertam interesses de diversos pesquisadores devido as propriedades intrínsecas do material, conforme explanado no subitem 2.1. Sendo assim serão apresentados trabalhos correlatos utilizando o resíduo das porcelanas e alguns resíduos com matéria-prima e características similares que podem ajudar no entendimento das interações resíduo/pasta de cimento.

Com isso o caput será dividido em três subitens: caracterização físico-química, resíduo cerâmico empregado como adição mineral e como agregado.

2.2.1. Caracterização físico-química

Bonetti *et. al.* (2006) apresenta características mecânicas e físicas dos isoladores que demonstram a qualidade do material, que são valores de resistências à compressão variando de 50 MPa a 140 MPa e valores de massa específica em torno de 2,2 g/cm³ a 2,5 g/cm³ (BONETTI, 2009).

Quanto as porcelanas dos vasos sanitários possui em sua composição química abundância de sílica e alumina, similar as das porcelanas dos isoladores, sendo que o módulo de elasticidade varia de 22 a 80 GPa e coeficiente de expansão térmica da ordem de 0,4 a 0,85 x 10⁻⁵ (AWGUSTNIK, 1980).

Andreola *et. al.* (2010) estudou resíduos da indústria de produção de revestimentos cerâmicos, de uma indústria do norte da Itália, no quais foram classificados em dois tipos em função do processo de produção e seu estado físico. Um grupo é composto de rejeitos advindos de

processos de pré-cozimento (prensagem, secagem, vitrificação, etc.) e o outro consiste em rejeitos da queima, derivados da seleção de ladrilhos e polimento. O primeiro designado de GR e o outro por PR.

O PR são lamas originárias do polimento dos revestimentos (cerca de 20.000 toneladas / ano nos distritos cerâmicos da Itália) resultante das estações de tratamento de águas residuais industriais após a etapa de polimento de porcelana. Esta operação é realizada em ladrilhos cozidos por dispositivos abrasivos feitos de carboneto de silício (SiC) e ligante à base de magnésio(MgOHCl).

Os subprodutos de polimento são essencialmente compostos por uma mistura de resíduos finos do corpo cerâmico queimado (75%) e resíduos grosseiros (SiC, Ca, Mg e compostos de cloro solúvel, proveniente dos instrumentos abrasivos utilizados no processo de polimento da superfície de ladrilhos). Contudo, a presença de alguns compostos (CaO, MgO, SiC e compostos de cloro) impede a reintrodução de lamas no ciclo cerâmico de produção.

O GR são lamas obtidas das águas residuais do tratamento da purificação dos revestimentos. A composição é estritamente dependente do tipo de esmalte fabricado (que também pode conter metais pesados tais como Pb, Cd, Cu, Zn, etc.) e compostos químicos utilizados para depuração (coagulantes inorgânicos / orgânicos, floculantes, etc.).

Na Tabela 2.3 estão os óxidos identificados através de análise química, sendo que o PR apresenta um percentual representativo de SiO₂ e Al₂O₃ vindos do quartzo, mulita e feldspato, que são constituintes principais do corpo do revestimento, álcalis característico de materiais cerâmicos e o ZrO₂ que é adicionado para dar brancura ao produto. Elementos alcalino-terrosos (em particular Mg) e SiC provêm de ferramentas abrasivas utilizadas no processo de polimento. Quanto à composição química GR, os constituintes principais são SiO₂ e Al₂O₃, juntamente com a presença de outros elementos (em particular, Ca, Ni, Mn, Zn, Co, Ba, Pb e V) estritamente relacionados com esmaltes e composição de esmalte.

Halicka *et. al.* (2013) e Guerra *et. al.* (2009) trabalharam com o resíduo originário dos vasos sanitários, e estes possuem características muito semelhantes ao das porcelanas dos isoladores, devido ao emprego de matérias-primas como argilas brancas e também relacionada a etapas importantes da produção como o processo de queima. Os óxidos identificados por Halicka estão apresentados na Tabela 2.3, resultantes de uma variação dos percentuais entre os componentes principais de fabricação, que como referência são em torno

de 30% quartzo, 26% feldspato, 26% caulim, 18% argila Clay, e o restante de vitrificados e óxido de metais.

Tabela 2.3 - Análise química de resíduos cerâmicos proveniente de argilas brancas

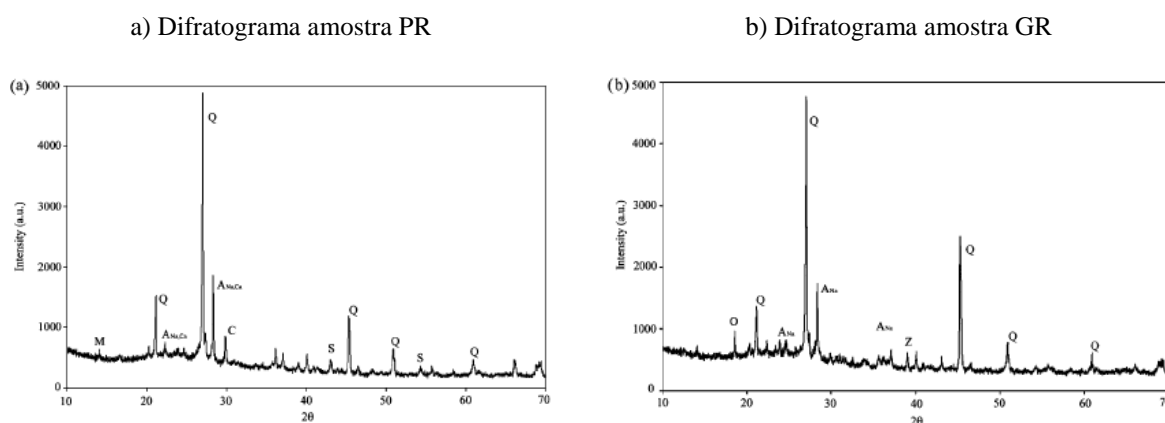
Elementos identificados	Resíduos e pesquisadores				
	PR (%) Andreola et. al. (2010)	GR (%) Andreola et. al. (2010)	Vaso Sanitário - Halicka, Ogrodnick e Zegardlo (2013)	Rocha Vulcânica CC - Binici (2007)	Porcelana dos isoladores-Ribeiro et. al.(2014)
SiO ₂	62,19	52,36	67,63	88,4	75,09
Al ₂ O ₃	15,75	19,37	24,05	7,3	16,86
TiO ₂	0,34	0,45	-	-	0,27
Fe ₂ O ₃	0,59	0,84	0,55	0,5	1,03
CaO	2,24	5,73	-	0,1	0,79
MgO	6,75	2,43	0,36	0,1	0,18
K ₂ O	1,46	1,32	3,00	-	4,42
Na ₂ O	3,71	3,9	1,25	-	0,39
ZrO ₂	1,19	3,01	-	-	0,02
NiO	<0,10	0,15	2,78	-	-
ZnO	0,12	0,99	-	-	-
BaO	<0,10	0,54	-	-	-
PbO	<0,10	0,49	-	-	0,11
P ₂ O ₅	0,19	0,2	-	-	-
B ₂ O ₃	-	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	0,08
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0,07
CuO	-	-	-	-	0,01
SrO	-	-	-	-	0,01
Rb ₂ O	-	-	-	-	0,05

Em trabalhos com porcelana dos vasos sanitários foram produzidos por Halicka *et. al.* (2013) e Guerra *et. al.* (2009) materiais de graduação com dimensão de grão e ambos obtiveram a massa específica de 2,36 g/cm³, sendo o diâmetro máximo característico obtido respectivamente de 8mm e 20 mm. Halicka *et. al.* também determinou por ensaio um percentual de absorção de água do resíduo bastante representativo quando comparado com os agregados naturais, no valor de 1,53%.

Dando prosseguimento a caracterização dos resíduos da indústria da cerâmica (ANDREOLA *et. al.*, 2010), a superfície específica obtida pelo equipamento B.E.T para as amostras foram 25,9 m²/g para as amostra de PR e 10,9 m²/g para amostra de GR. Quanto as análises

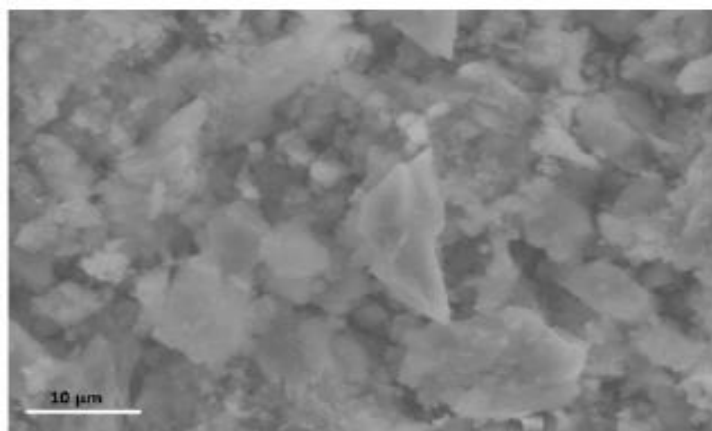
realizadas pelo equipamento de difração de raios X (Figura 2.3), as análises identificaram tanto para PR como para GR, o SiO_2 como principal constituinte. Além disso, em PR, a albita calciana ($(\text{Na}, \text{Ca})_{14}\text{Si}_4\text{O}_8$), derivada do corpo de grés porcelânico foi evidenciado. Também foram determinados vestígios de calcita e SiC, derivados das ferramentas abrasivas. Em amostras de GR, além de SiO_2 , foram determinadas fases cristalinas como zircão e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), vestígios de calcita e óxido de lítio / crómo, derivados de esmaltes.

Figura 2.3 – Difratomogramas de raios X de amostras: a) PR b) GR



Bignozzi e Saccani (2012), através de imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, observou a morfologia dos grãos do resíduo de PR (Figura 2.4), onde se apresentam grãos ligeiramente lamelares e irregulares, com diâmetro entre 10 e 20 μm , aspecto bastante similar ao pó do resíduo da porcelana dos isoladores.

Figura 2.4 – Micrografia apresentando morfologia do pó proveniente da moagem de resíduo cerâmico PR

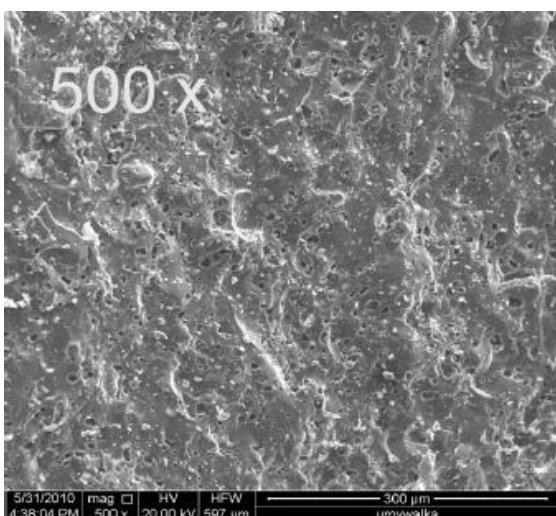


Halicka *et. al.* (2013) apresenta imagens geradas pelo microscópio eletrônico de varredura da superfície da porcelana do resíduo dos vasos sanitários em diferentes ampliações, onde é

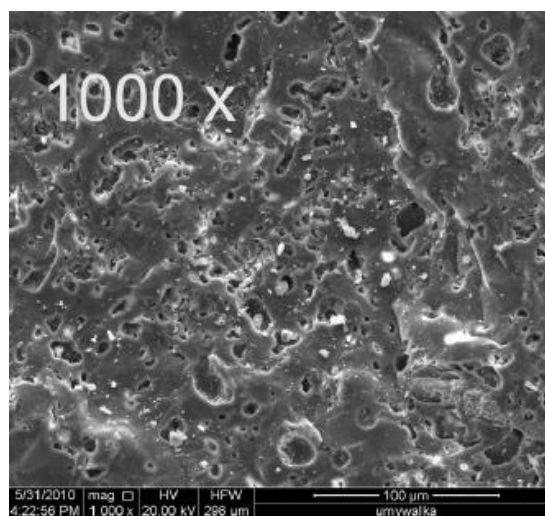
possível observar uma distribuição uniforme de poros na matriz, de morfologia relativamente irregular. Na Figura 2.5 estão apresentadas as imagens com ampliações variando de 500 a 2000 x mais os respectivos espectros obtidos por EDS identificando os elementos químicos da amostra.

Figura 2.5 – Micrografia apresentando morfologia da superfície do resíduo de vaso sanitário. a) Imagem com ampliação de 500x; b) Imagem com ampliação de 1000x; c) Imagem com ampliação de 2000x; d) Intensidade dos espectros obtidos por EDS na amostra

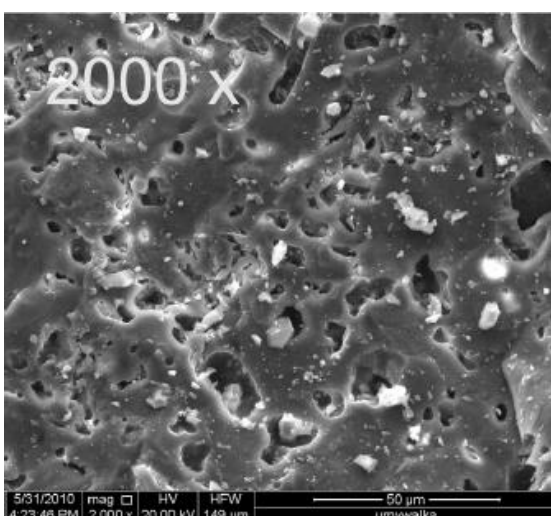
a) Imagem com ampliação de 500x



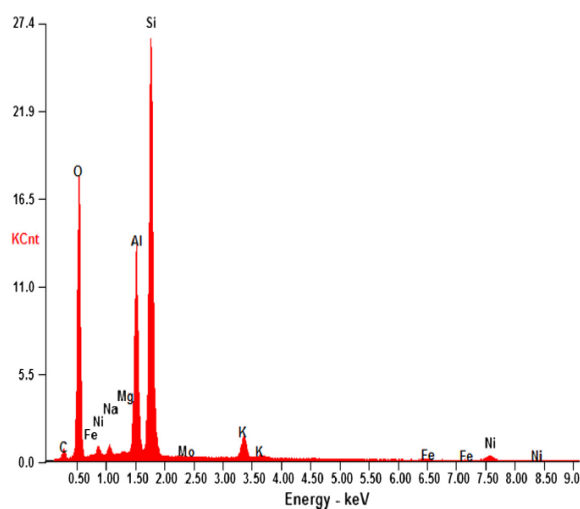
b) Imagem com ampliação de 1000x



c) Imagem com ampliação de 2000x



d) Intensidade dos espectros obtidos por EDS na amostra



2.2.1 Resíduo cerâmico empregado como adição mineral ao concreto

Uma das formas de utilização do resíduo cerâmico é incorporando o material em granulometria de pó como substituição ou adição ao cimento. Para avaliar a possibilidade de utilização como adição mineral, uma análise importante é a avaliação da reatividade do resíduo na presença da pasta de cimento. Andreola *et. al.* (2010) realizou o ensaio para determinação da reatividade através do ensaio de índice de atividade pozolânica com o cimento aos 28 e 90 dias conforme a norma EN 450-1 (UNE, 2013), sendo que aos 90 dias ambas as amostras obtiveram resultados acima do limite preconizado pela norma. Na Tabela 2.4 observam-se os resultados obtidos aos 28 e 90 dias, evidenciando um crescimento com a evolução das idades de ensaio.

Tabela 2.4 – Índice de atividade pozolânica com resíduo cerâmico – EN 450-1 (UNE, 2013)

Mistura argamassa	Índice de atividade (%)	
	28 dias	90 dias
75% Cimento + 25%PR	89,9	101,4
75% Cimento + 25% GR	84,3	88,0
Limites da norma EN 450-1	≥ 75%	≥ 85%

Os resíduos cerâmicos foram estudados como adições ao cimento e os novos ligantes foram constituídos por 75% de cimento e 25% de resíduos, no qual foram caracterizados quimicamente, fisicamente e mecanicamente com referência aos requisitos EN 197-1 (UNE, 2011) e os resultados comparados com a argamassa de referência com 100% cimento. Os resultados foram otimistas sendo que análises por termogravimetria e difração de raios X das amostras de argamassa contendo 25% de resíduos do PR apresentaram redução da portlandita com a evolução da idade de 28 para 90 dias, apresentando uma redução de 23,5 % em comparação a argamassa de referência. Resultados das análises por intrusão de mercúrio nas amostras demonstraram um refinamento dos poros com a evolução da hidratação, provavelmente um efeito da reatividade pozolânica do PR com o cimento. Quando se analisa todas as técnicas discutidas anteriormente para o resíduo GR, o mesmo não obteve o mesmo comportamento, apresentando características de um material fíler quase inerte.

Resultados de Microscopia eletrônica e análise por EDS confirmam que PR é quimicamente ativo, pois sendo auxiliado pelo ambiente altamente alcalino da pasta de cimento, o PR reage com a portlandita. Foi observado tanto o gel C-S-H, como também um gel de K-A-S-H ao longo das idades. Fases com composição semelhante foram encontradas em sistemas de

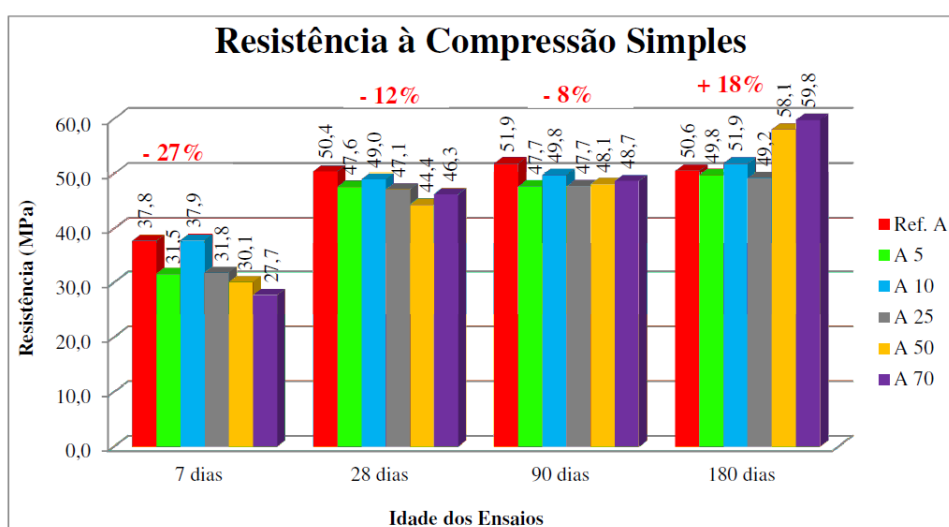
geopolimerização onde resíduos alcalinos ativados e metacaulim reagem juntos levando a microestrutura compacta. Este comportamento pode ajudar a entender o comportamento diferenciado e reativo do PR frente ao resíduo GR, observados nos valores do índice de atividade pozolância (Tabela 2.4) e nas resistências à compressão da argamassa, conforme Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Resistência à compressão com resíduo cerâmico – EN 197-1 (UNE, 2011)

Argamassas	Mistura	Resistência à compressão (MPa)	
		2 dias	28 dias
REF	100% cimento	40,4	63,2
PR	75% Cimento + 25%PR	31,1	56,8
GR	75% Cimento + 25% GR	21,6	53,3
Limites Norma EM 197/1 para cimento		≥ 30,0	≥ 52,5

Campos (2011) estudou o material fino proveniente da porcelana dos isoladores, analisando também o potencial para utilização como adição ao cimento. Para tanto, foram moldadas argamassas, nas quais foi acrescentado ao cimento o resíduo de porcelana nas seguintes proporções: 5%, 10%, 25%, 50% e 70%, percentuais adicionados em massa ao cimento. Para o estudo o pesquisador fixou a relação água/cimento em 0,55 e analisou o comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão. Na Figura 2.6 estão as médias dos resultados obtidos para todas as idades e situações, sendo os valores em vermelho sobre as barras os máximos resultados obtidos para a idade de ensaio.

Figura 2.6 - Valores de resistência à compressão de argamassas utilizando o pó da porcelana como adição (Campos, 2011)



A legenda utilizada a letra “A” representando a adição e o numeral na sequência o percentual da quantidade adicionada. Os ensaios de resistência à compressão apresentaram uma queda com a idade nas diferenças entre as argamassas com adição de resíduo e o referencial, passando de -27% para -8% aos 90 dias. As argamassas com adição de 10% de resíduo nas idades de 7 a 90 dias apresentaram os melhores resultados entre as argamassas com resíduo, sendo ultrapassada aos 180 dias pelas adições com percentual maior. Também observa-se que apenas aos 180 dias as substituições conseguem ultrapassar a resistência à compressão da argamassa de referência, isto é explicado pelo pesquisador devido a atividade pozolânica tardia da porcelana.

Resíduos provenientes do polimento de porcelanato da indústria de produção de revestimento também foram estudados para avaliar o potencial reativo em trabalhos desenvolvidos por Jacoby e Pelisser (2015). Torna-se interessante apresentar os resultados do trabalho quanto ao potencial de reatividade como adição mineral, devido à origem do material cerâmico, que possui características muito semelhantes quanto à composição química, sendo 66% sílica e 18% de alumina, e física, com diâmetro da partícula em torno de 10 µm. A matéria-prima utilizada também é proveniente da argila branca e outros elementos.

Nesse estudo, argamassas foram moldadas com substituição (em massa) de 5%, 10% e 20% do cimento pelo resíduo e estudadas quanto à resistência à compressão nas idades de 28 e 84 dias. As amostras de resíduo também foram submetidas ao índice de atividade pozolânica e análises por termogravimetria com o intuito de se observar uma possível atividade pozolânica. Aos 28 dias os maiores teores de substituições apresentaram queda na resistência, mas na idade avançada de 84 dias obtiveram resultados superiores à referência. As análises de termogravimetria apresentaram para as argamassas com adição de material cerâmico menores perdas de massas à temperatura equivalente à desintegração da fase portlandita do que a argamassa de referência, evidenciando a interação das reações pozolânicas para a idade de 84 dias. O índice de atividade pozolânico com cimento apresentou valores da relação aos 28 dias com cimento CP II de 1,01 e CP V de 0,98 e aos 84 dias com cimento CP II de 1,10 e CP V de 1,18, ultrapassando o valor preconizado pela norma de 1 para ser considerado material com possibilidade de atividade pozolânica.

2.2.2. Resíduo cerâmico empregado como agregado ao concreto

Como uma forma mais didática de apresentar os resultados dos pesquisadores que utilizaram materiais cerâmicos advindos de argila branca, será dividido o conteúdo por propriedades estudadas: resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e abrasão-erosão.

2.2.2.1. Resistência à compressão

Senthamarai e Devadas Manoharan (2005) estudaram a propriedade mecânica de resistência à compressão do concreto com a utilização de agregado proveniente do resíduo de porcelanas dos isoladores descartados, em substituição ao agregado convencional oriundo da britagem de rochas, para diferentes concretos. Estes concretos foram realizados para relações água cimento variando de 0,35 a 0,60. As porcelanas foram substituídas apenas nos agregados graúdo. Na Tabela 2.6 estão apresentados os resultados de resistência à compressão para a idade de 28 dias.

Tabela 2.6 – Resistência à compressão do concreto com e sem resíduo

1:AM:AG	Relação A/C	Consumo (kg/m ³)	Slump resíduo (mm)	RC resíduo (MPa)	CV	Eficiência (MPa/kg)	Slump natural (mm)	RC natural (MPa)	CV	Eficiência (MPa/kg)
1:1,39:2,38	0,35	531	13	51,0	3,28	0,096	10	53,0	2,79	0,100
1:1,73:2,71	0,40	465	24	45,8	4,17	0,098	18	46,0	2,35	0,099
1:2,08:3,05	0,45	413	45	40,0	4,05	0,097	35	40,0	3,18	0,097
1:2,42:3,39	0,50	372	64	37,0	2,46	0,099	48	38,0	2,29	0,102
1:2,76:3,73	0,55	338	99	34,0	2,44	0,101	80	35,0	2,03	0,104
1:3,10:4,07	0,60	310	155	30,0	2,73	0,097	148	31,0	1,77	0,100

Os concretos obtiveram uma média de eficiência bastante representativa de 0,10 MPa/kg de cimento, valores normalmente obtidos para bons concretos. Foi possível identificar que os concretos com materiais advindos de areia natural e brita proveniente de rochas, identificada como natural na Tabela 2.6, obtiveram resultados ligeiramente melhores de resistência à compressão, mas com patamares bastante próximos, quando comparado com os concretos com resíduo dos isoladores. Os valores de resistência à compressão variaram entre 51 e 30 MPa.

Quanto às propriedades dos concretos no estado fresco, as medidas do ensaio de abatimento tronco cônico apresentaram valores superiores para os concretos com resíduo, sendo que o

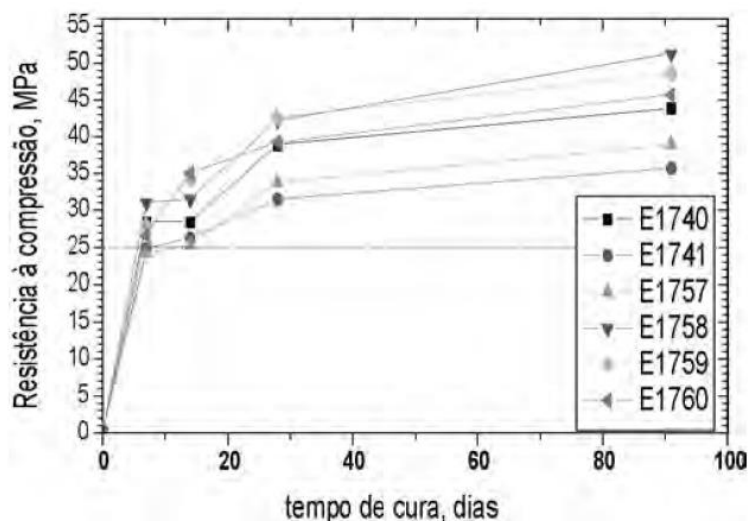
incremento de água unitária para as relações 0,55 e 0,60 foram suficientes para proporcionar trabalhabilidade para ambos os concretos, mesmo com características diferentes.

Para os concretos moldados por Portella *et. al.* (2006), a relação água cimento foi fixada em 0,50, mas o consumo de cimento variou entre 342 Kg/m³ e 360 kg/m³ juntamente com o abatimento de 15 mm a 55 mm. Os concretos moldados foram 0%, 50% e 100% de resíduo em substituição ao agregado miúdo e graúdo simultaneamente. O consumo de 360 kg/m³ e abatimento de 55 mm dizem respeito ao concreto de referência.

Na Figura 2.7 estão as curvas de evolução de crescimento da resistência à compressão ao longo das idades, sendo que os concretos sem resíduo, tanto os concretos utilizando cimento CP II F-32 como os utilizando CP V ARI RS foram os que atingiram os maiores valores de resistência. Apesar dos consumos serem menores na ordem de 5% para os concretos com resíduo, é importante uma avaliação da eficiência obtida no concreto de referência, pois os valores de resistência foram maiores em aproximadamente 10%, podendo igualar a condição dos consumos.

Figura 2.7 – Curvas de evolução da resistência à compressão de concretos com relação água cimento 0,50.

(PORTELA *et. al.*, 2006)



Na Tabela 2.7 estão às correlações entre as dosagens e os tipos de concreto da Figura 2.7.

Tabela 2.7 – Tabela explicativa da legenda da Figura 2.7.

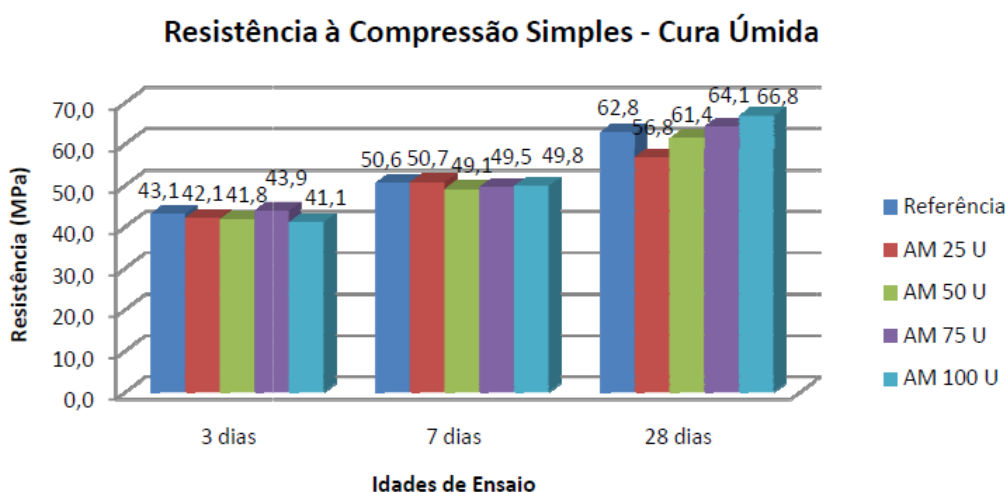
CP II F-32	% subst.	CP V ARI	% subst.
E-1740	0%	E-1758	0%
E-1741	50%	E-1759	50%

E-1757	100%	E-1760	100%
--------	------	--------	------

Os valores de resistência obtidos na Figura 2.7 estão entre 35 MPa e 44 MPa para os concretos com cimento CP II-F 32 e são da ordem de 45 MPa e 51 MPa para os concretos com o cimento CP V ARI RS.

Nos trabalhos desenvolvidos por Campos (2009), foi observada uma diminuição na resistência à compressão do concreto quando substituído o agregado miúdo por resíduo de isoladores de porcelana, mas mesmo assim atingindo valores expressivos de resistência. O AM100 U (100% de substituição do agregado miúdo por resíduo) foi o concreto que obteve melhor resultado aos 28 dias, ultrapassando o concreto de referência (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Gráfico de barras para os concretos com substituição do agregado miúdo por resíduo. (CAMPUS, 2009)

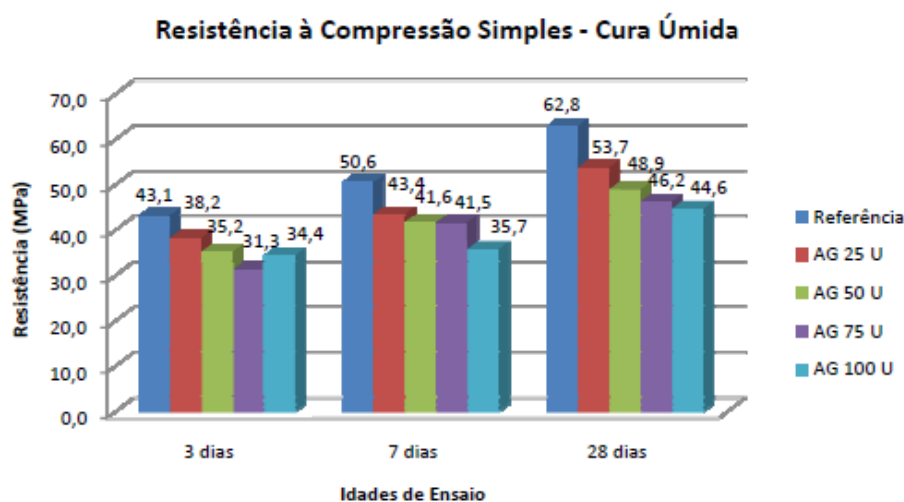


Campos (2009) atribui esse comportamento à uniformidade dos grãos de porcelana obtida após sua moagem, conferindo ao concreto melhor adensamento, resultando em melhores resultados frente ao agregado convencional. Analisando todos os resultados dos ensaios, as substituições do agregado miúdo que obtiveram melhor êxito foram os concretos com substituições de 75% (AM 75 U) a 100% (AM 100 U) para a idade de 28 dias.

Quando a substituição foi no agregado graúdo, sendo o agregado graúdo na dimensão máxima característica de 19 mm, o impacto foi mais pronunciado nos valores de resistência à compressão, sendo observados valores inferiores a 30% aos 28 dias (Figura 2.9). Constatou-se que isso se deve provavelmente ao formato lamelar que a porcelana adquire ao ser moída e a

sua área vidrada, fatores estes que interferiram na aderência da argamassa do concreto com estes agregados alternativos.

Figura 2.9 – Gráfico de barras para os concretos com substituição do agregado graúdo por resíduo. (CAMPUS, 2009)

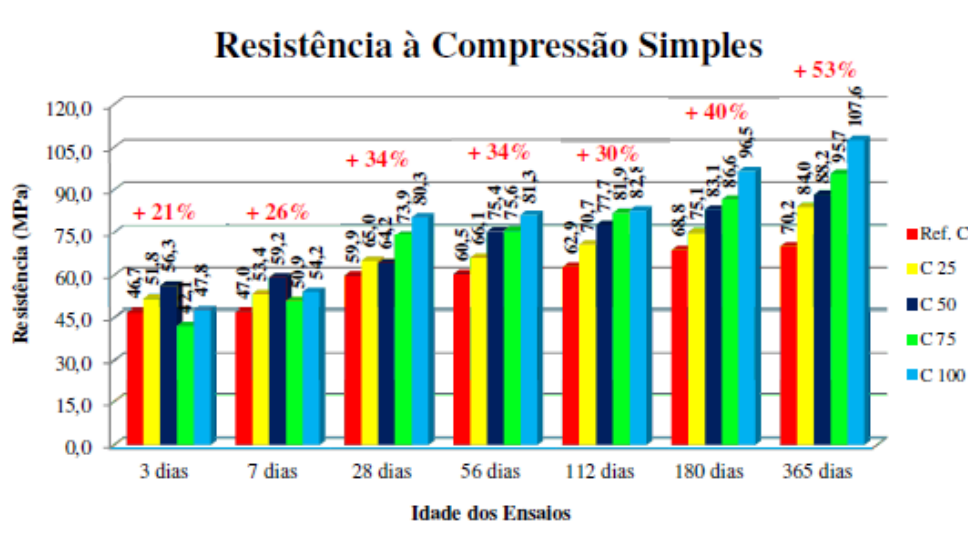


Em contrapartida, na tese de doutorado de Campos (2011), os valores de resistência à compressão foram superiores ao concreto de referência, tanto para as substituições no agregado miúdo quanto para os concretos onde a substituições ocorreram simultaneamente no miúdo e graúdo. O pesquisador justifica este comportamento a menor interferência proporcionada pelo agregado na ruptura face esmalte/pasta, justificativa por Franck *et al.* (2004); Portella *et al.* (2006); Santolaia *et al.* (2007); Lintz *et al.* (2008) e Campos (2009) como responsável pela queda nas propriedades mecânicas. Este comportamento favorável possui contribuição pela dimensão máxima característica de 9,5 mm adotada na pesquisa, proporcionando com isso agregado menos lamelares, menor efeito parede e concretos com características melhores de adensamento.

Na substituição de agregado miúdo por resíduo de porcelana, os concretos obtiveram um incremento de resistência à compressão que foi explicado por um provável efeito pozolânico e a baixa capacidade de absorção do material provocado, principalmente, pelo material passante na peneira 75 μ m.

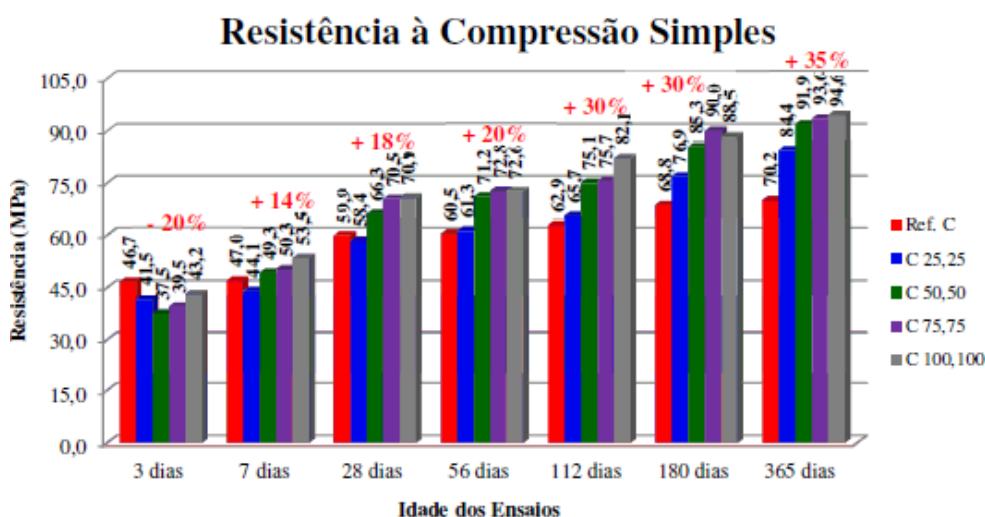
Na Figura 2.10 estão os valores de resistência à compressão para as misturas com substituições apenas no miúdo, onde existe ganhos de até 53% de resistência à compressão aos 365 dias com relação à referência.

Figura 2.10 – Gráfico de barras para os concretos com substituição do agregado graúdo por resíduo. (CAMPUS, 2011)



Na Figura 2.11 estão os valores de resistência à compressão para as misturas com substituições em ambos os agregados, tanto no miúdo quanto no graúdo.

Figura 2.11 – Gráfico de barras para os concretos com substituição nos agregado graúdo e miúdo por resíduo. (CAMPUS, 2011)

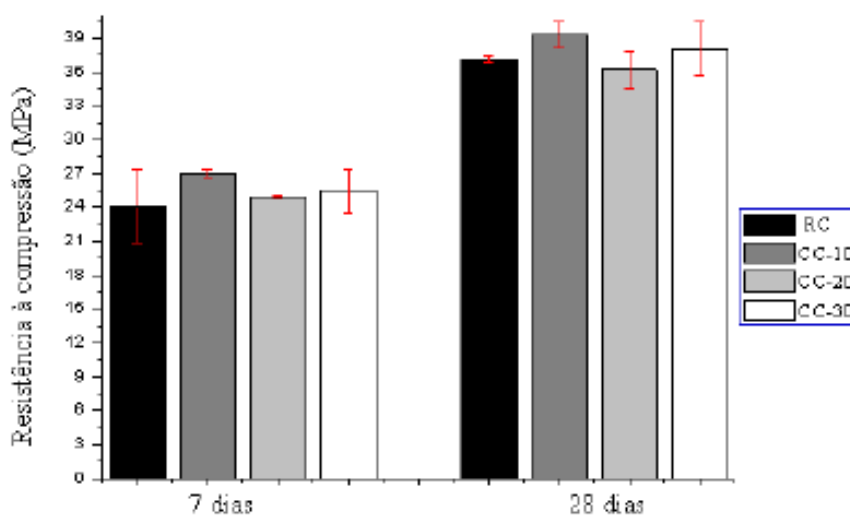


Nos concretos de Ribeiro *et. al.* (2014), a substituição do agregado por resíduo de porcelana dos isoladores foi feita apenas no agregado graúdo em proporções de 10%, 20% e 30% em massa. Os materiais utilizados para realização dos concretos foram: cimento CP IV 32, areia

natural de cava, agregado graúdo de origem basáltica e resíduo de isoladores proveniente da empresa CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz).

Os concretos no estado fresco obtiveram valores baixos de abatimento, na ordem de 23 ± 2 mm, pouco fluído para alguns tipos de aplicação. A relação utilizada foi de 1:2,8:3,6 (cimento:areia:brita) para uma relação água/cimento de 0,60, e idades de ruptura de 7 e 28 dias. Na Figura 2.12 estão apresentados os gráficos de barras, no qual é possível observar os resultados dos ensaios de resistência à compressão. A nomenclatura utilizada para os concretos foram: 10% de substituição no agregado graúdo, identificado por CC-10, 20% de substituição CC-20, 30% de substituição CC-30 e o referência identificado como RC.

Figura 2.12- Valores de resistência à compressão do concreto de A/C 0,60 utilizando resíduo de isoladores em substituição ao agregado graúdo (RIBEIRO *et. al.*, 2014)



Os concretos apresentaram crescimento significativo de 7 para 28 dias, 45,3% para CC-10, de 45,1% para CC-20, 49,62% para CC-30 e 54% para RC. Os resultados maiores foram obtidos para substituição de 10% para todas as idades, mas comparando com a referência, exceto para CC-20 aos 28 dias, todos os resultados utilizando resíduo foram superiores.

2.2.2.2. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade elástica do concreto muito importante na engenharia de construções, pois influencia no dimensionamento das estruturas para a tomada de decisões quanto ao ritmo de retirada de escoras, liberação para esforços de transporte para pré-moldados, análise de deformações em estruturas verticais. É uma propriedade de crucial

importância para a avaliação do aspecto funcional (estado limite de utilização) e no de segurança (estado limite último) (ACITO & GUERRINI, 1999).

Sendo o concreto constituído de diferentes materiais, tornando-o heterogêneo e multifásico, a porosidade dos agregados e pasta possui grande influência na deformabilidade e estabilidade dimensional. Fatores como fração volumétrica, módulo de deformação dos principais constituintes e as características da zona de transição determinam o comportamento elástico (MEHTA, 2014).

O agregado possui um papel bastante importante restringindo as deformações da matriz, e por isso a porosidade do mesmo, que influencia no próprio módulo de elasticidade do agregado, além da proporção volumétrica, vão influenciar diretamente nos valores obtidos de deformação.

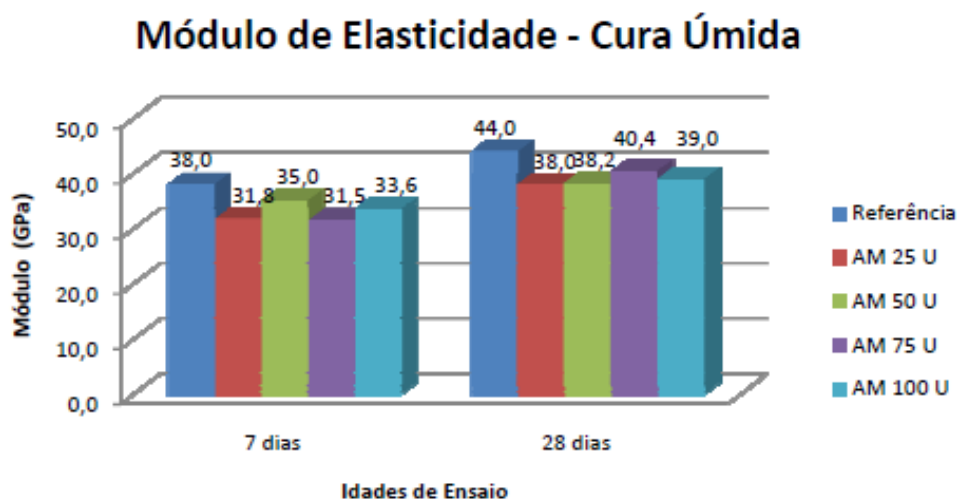
Santhamarai e Devadas Manoharan (2005) realizaram estudos para determinação de módulo de elasticidade, no qual estão apresentados na Tabela 2.8, onde com a substituição do agregado graúdo por resíduo de porcelana dos isoladores, obteve resultados relativamente baixos para o patamar de resistências à compressão. Concreto com resistência à compressão de 51 MPa obteve módulo de elasticidade de 22,2 GPa. Os resultados obtidos para os concretos com resíduo foram em média 10% inferiores.

Tabela 2.8 – Valores de módulo de elasticidade para concretos com substituição do agregado graúdo por resíduo de porcelana dos isoladores. Relação água cimento variando de 0,35 a 0,60

1:AM:AG	Relação A/C	Consumo (kg/m ³)	Slump resíduo (mm)	Módulo de Elasticidade Resíduo (GPa)	Slump natural (mm)	Módulo de Elasticidade Natural (GPa)
1:1,39:2,38	0,35	531	13	22,2	10	25,1
1:1,73:2,71	0,40	465	24	20,3	18	23,5
1:2,08:3,05	0,45	413	45	19,0	35	21,3
1:2,42:3,39	0,50	372	64	17,9	48	20,5
1:2,76:3,73	0,55	338	99	17,5	80	18,3
1:3,10:4,07	0,60	310	155	16,1	148	16,5

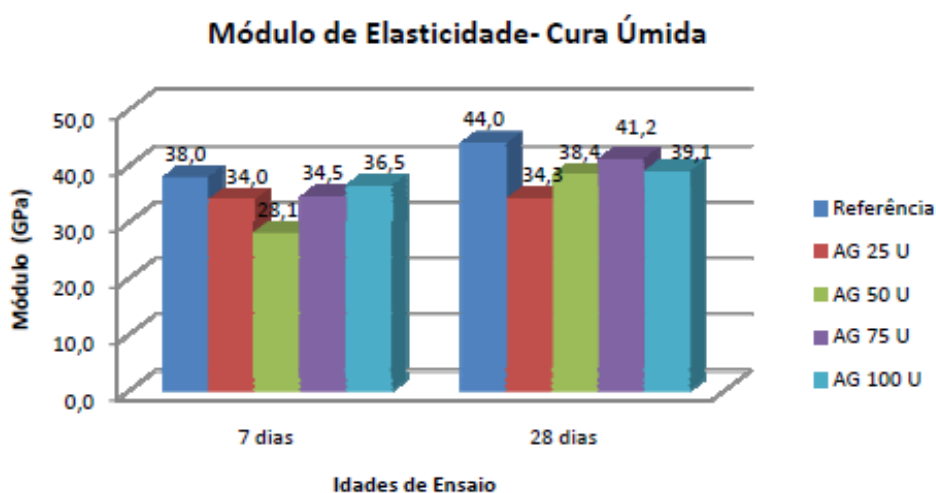
Campus (2009) também obteve valores inferiores de módulo de elasticidade para os concretos no qual a houve substituições por resíduo, para as dosagens com resíduo no miúdo e também no graúdo, conforme pode ser observado nas Figuras 2.13 e 2.14.

Figura 2.13- Valores de módulo de elasticidade para os concretos com as substituições de 25%, 50%, 75% e 100% de agregado convencional por resíduo no agregado miúdo (CAMPUS, 2009)



Os concretos que aproximaram mais dos valores ao de referência foram os concretos AM 75 (Figura 2.13), com substituição de 75% do agregado convencional miúdo por resíduo da porcelana e o AG 75 (Figura 2.14), que representa substituição de 75% do agregado convencional graúdo por resíduo.

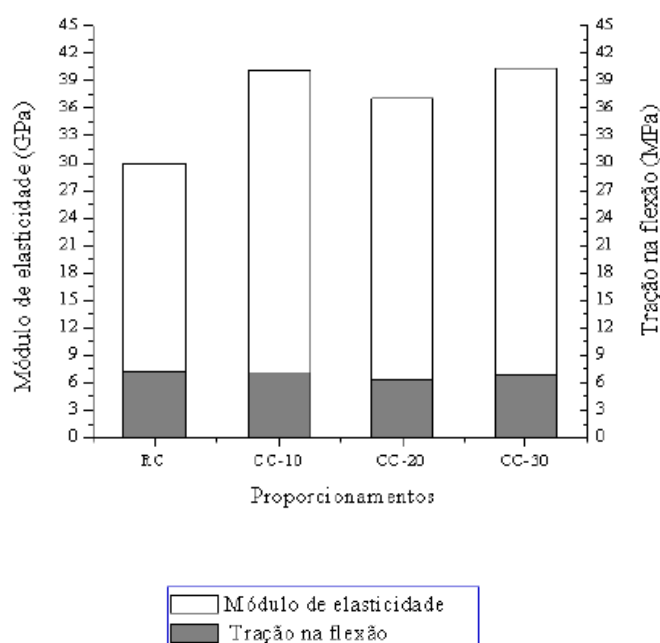
Figura 2.14 - Valores de módulo de elasticidade para os concretos com as substituições de 25%, 50%, 75% e 100% de agregado convencional por resíduo no agregado graúdo (CAMPUS, 2009)



Os valores de módulo de elasticidade obtidos estão em torno de 40 GP, valor bem significativo para a propriedade, resultando em deformações minimizadas.

Em contrapartida Ribeiro *et. al.* (2014) encontrou resultados nos concretos analisados no qual o módulo de elasticidade aumentou significativamente em aproximadamente 10 GPa entre o referênciã e os concretos com incorporação de porcelana. O concreto de referênciã obteve um módulo de elasticidade da ordem de 30 GPa e os concretos utilizando resíduo entre 37 e 40 GPa, conforme pode ser visto na Figura 2.15.

Figura 2.15- Valores de módulo de elasticidade para os concretos com as substituições de 10%, 20% e 30% de agregado convencional por resíduo no agregado graúdo (Ribeiro *et. al.*, 2014)



O aumento no módulo de elasticidade observado na Figura 2.15, é explicado por Ribeiro *et. al.* (2014) como atribuído à natureza rígida, maior dureza das porcelanas dos isoladores, resultante de sua composição química e baixa porosidade.

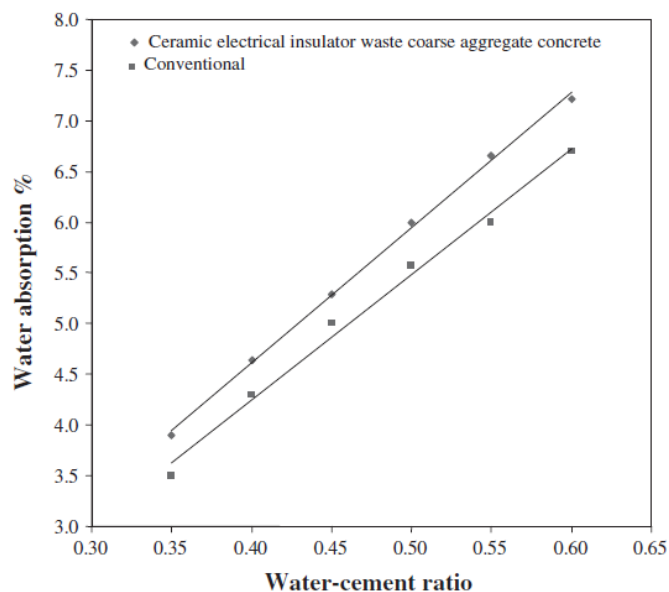
2.2.2.3. Absorção por água

Absorção de água é definida como o transporte de líquidos em sólidos porosos causados pela tensão superficial atuando nos capilares (Basheer, Kropp, Cleland, 2001).

Senthamarai *et. al.* (2011) estudou os meios porosos com intuito de verificar o comportamento do concreto quando o mesmo é atacado por cloretos. Como a quantidade de poros, sua interconexão e forma influenciam o mecanismo de transporte de agentes patológicos, o estudo deste sistema é de suma importância para o entendimento das propriedades de durabilidade.

Foram moldados concretos com relação água cimento variando de 0,35 à 0,60, sendo que na Figura 2.16 está apresentado os pontos que correlacionam a relação água cimento e o percentual de absorção de água para os diferentes concretos ensaiados pela norma C642 (ASTM, 2006).

Figura 2.16- Valores de absorção por água para as diferentes relações água cimento do concreto.
(SENTHAMARAI *et. al.*, 2011)



Os resultados apresentados nas Figuras 2.16 demonstraram que tanto os concretos com isolador elétrico quanto os concretos convencionais se comportaram de forma similar e com a absorção de água aumentando com o aumento da relação água-cimento para ambos.

Na literatura é relatado que a absorção não pode ser usada como uma medida de qualidade do concreto, mas, em geral, um bom concreto tem absorção abaixo de 10% em massa (NEVILLE, 1999). Na pesquisa ao atingir 28 dias de idade, a absorção de água do concreto com resíduo para diferentes relações água-cimento variou de 3,74% a 7,21%, enquanto para o concreto convencional variou de 3,1% a 6,52% (SENTHAMARAI *et. al.*, 2011).

2.2.2.4. Abrasão-erosão

Halicka *et. al.* (2013) observando as propriedades elásticas e térmicas das porcelanas dos vasos sanitários, no qual possui elevado módulo de elasticidade e baixo coeficiente de expansão térmica, decidiu estudar o material incorporado no concreto, avaliando alguma correlação entre as propriedades inerentes ao material e os resultantes do concreto com a

incorporação do mesmo. Assim, uma das propriedades de interesse foi a abrasão-erosão do concreto, que foi averiguada através do ensaio realizado pelo disco de Bohme, utilizando a norma EN 14157 (UNE, 2005).

As três situações de moldagem foram agregado natural com cimento Portland e alto teor de alumina e agregado de resíduo com cimento de alto teor de alumina. Os concretos com resíduo obtiveram uma resistência à abrasão 20 % superior aos outros concretos.

Outro tipo de ensaio usado para avaliação da resistência superficial do concreto foi utilizado por Binici (2007), o ensaio de abrasão especificado pela norma da Turquia TS EN 3262, que compreende expor cubos de amostras de concreto com dimensões de 150 x 150 x 50 mm, durante 60 segundos, aplicando um jato de areia com pressão 40 N/mm² e fluxo de 600 g/mim, que verifica a capacidade da argamassa em resistir à abrasão. Binici (2007) utilizou desta norma para estudar concretos com incorporação de resíduo de rochas vulcânicas substituindo no agregado miúdo nas percentagens de 40%, 50% e 60%. Foram utilizados dois tipos de rochas vulcânicas caracterizadas por CC e CBP, ambas são rochas vulcânicas.

Os concretos obtiveram uma pequena variação de relação água cimento, variando de 0,46 a 0,50, que podem ter influenciado no resultado da pesquisa. Os concretos que obtiveram melhores resultados tanto a resistência à compressão quanto a resistência à abrasão, avaliando de forma geral, foram os utilizando resíduo CC e CBP, quando comparado ao referência (sem resíduo). Dentre os dois tipos de resíduo, as amostras contendo 60 % de CC atingiu os maiores valores de resistência à compressão, 1,52 vezes o valor do concreto de referência. Quanto aos ensaios de abrasão, o mesmo atingiu 30 % acima dos valores obtidos com concreto de resíduo CBP, influenciado pela resistência à compressão.

2.3. REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO PROVENIENTE DO RESÍDUO DO MATERIAL CERÂMICO NO CONCRETO

Para estudar e verificar o comportamento do resíduo dentro da matriz cimentícia e a sua estabilidade dimensional e química no concreto, é de suma importância verificar o potencial de interação entre o resíduo e os elementos químicos dos materiais constituintes do concreto.

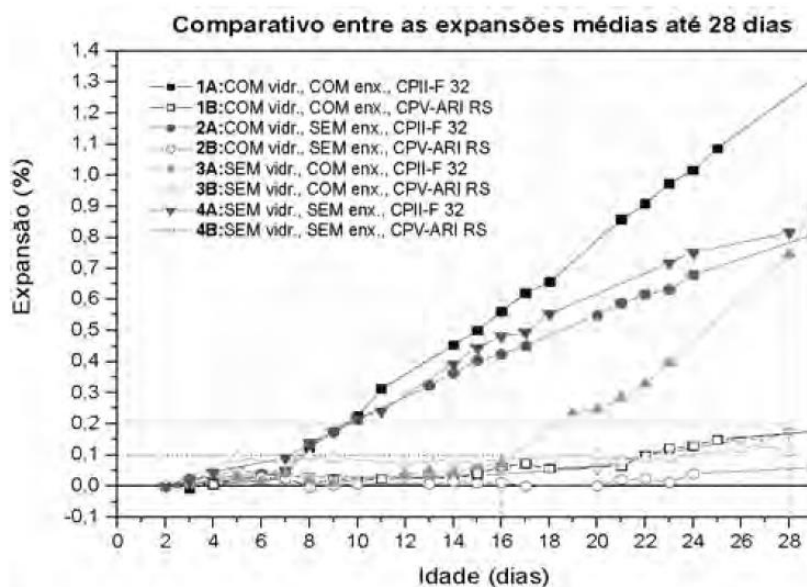
Carles-Gibergues e Hornain (2014), no capítulo destinado às reações expansivas de origem endógena, atentam que estas são manifestações patológicas nas quais não há aporte de agentes

agressivos e sim um conjunto de reações químicas que ocorrem entre a solução intersticial do concreto e certas fases reativas do agregado, no caso o resíduo.

Como grande parte da porcelana britada é constituída de sílica, o tipo de reação provável de ocorrer é a reação álcali-sílica, onde a sílica amorfa presente no resíduo, mal cristalizada ou microcristalina, é atacada pela solução intersticial dos poros do concreto e, posteriormente, ocorre a reação dessa sílica com os álcalis (íons de Na e K) da própria solução, gerando produtos expansivos. O produto formado é um gel, que possui características expansivas, provocando com o tempo expansão, fissuração, desagregação e queda de desempenho mecânico do concreto.

Em um trabalho desenvolvido por Portella, Joukoski, Franch e Derksen (2006), argamassas utilizando resíduo de porcelanas dos isoladores foram moldadas em prismas de 25 mm x 25 mm x 300 mm e imersos em solução de NaOH à 1N, à temperatura de 80°C, conforme recomenda a C1260 (ASTM, 1994). Três materiais foram separados, sendo a parte pintada chamada de vidrado, o miolo totalmente branco intitulado de sem vidrado e o material com enxofre, que é a porcelana contaminada com enxofre da argamassa de fixação do isolador. A pesquisa buscou verificar qual parte do isolador contribuiu significativamente para que desencadeasse o processo da reação álcalis-agregado. Para isso foram estudadas argamassas utilizando dois diferentes tipos de cimento: CP V RS e CP II-F 32, compondo com amostras de porcelana com vidrado e enxofre, seguidas dos traços sem vidrado e sem enxofre, com vidrado e sem enxofre e, finalmente, sem vidrado e com enxofre. Na Figura 2.17 estão apresentados os resultados das expansões ao longo das idades das argamassas estudadas.

Figura 2.17- Valores de absorção por água para as diferentes relações água cimento do concreto.
(SENTHAMARAI *et. al.*, 2011)



Destes resultados apresentados na Figura 2.17, pode-se considerar que o enxofre, no período considerado, possuiu pouca influência na expansibilidade resultante e que a maior influência foi da própria massa de porcelana moída, ou seja, a massa com maior concentração de sílica reativa. O cimento CP V ARI RS foram às composições que apresentaram maiores resistências as expansões em comparação ao cimento CP II F 32. Também se constatou o grande potencial de reatividade que existe no resíduo, o que leva à necessidade de se estudar melhor o cimento que deverá ser utilizado visando a uma possível mitigação.

A reação álcalis-agregado também foi identificada através de análises por microscópico eletrônico de varredura, que através de imagens da superfície das fraturas foi possível identificar a formação de gel gretado nos macro poros (Figura 2.18). Apesar das composições com cimento CP V ARI RS não ultrapassarem o limite da norma C 1260 (ASTM, 1994), foram identificados o produto da reação, mas em proporções menores, conforme pode ser observado na Figura 2.19 e confirmado com os picos obtidos por EDS.

Figura 2.18- Micrografia e espectrômetro obtidos em M.E.V realizado em amostra de argamassa compoondo CP II F e resíduo de isoladores aos 91 dias de idade

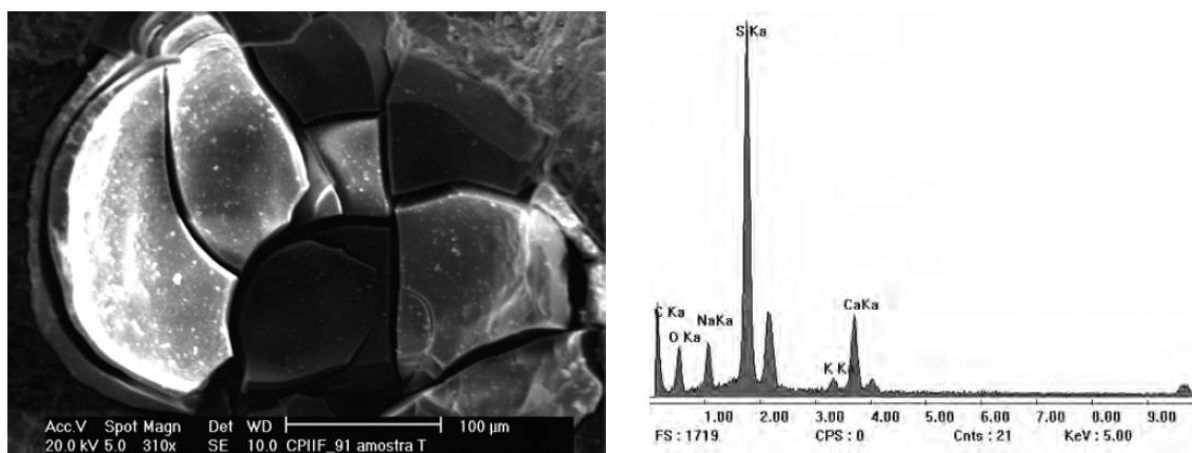
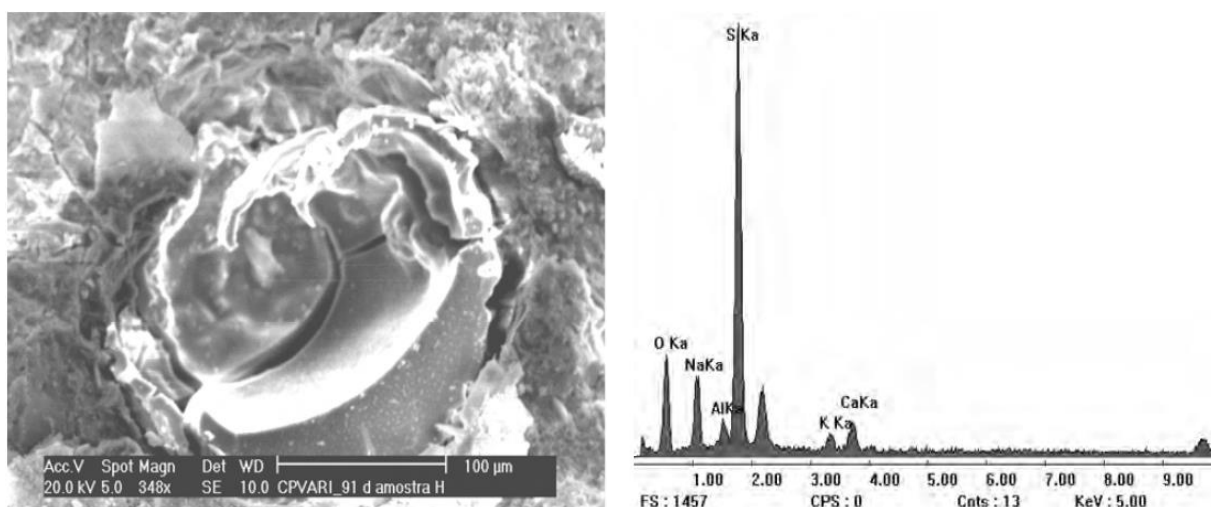


Figura 2.19- Micrografia e espectrômetro obtidos em M.E.V realizado em amostra de argamassa compoondo CP V Ari e resíduo de isoladores aos 91 dias de idade

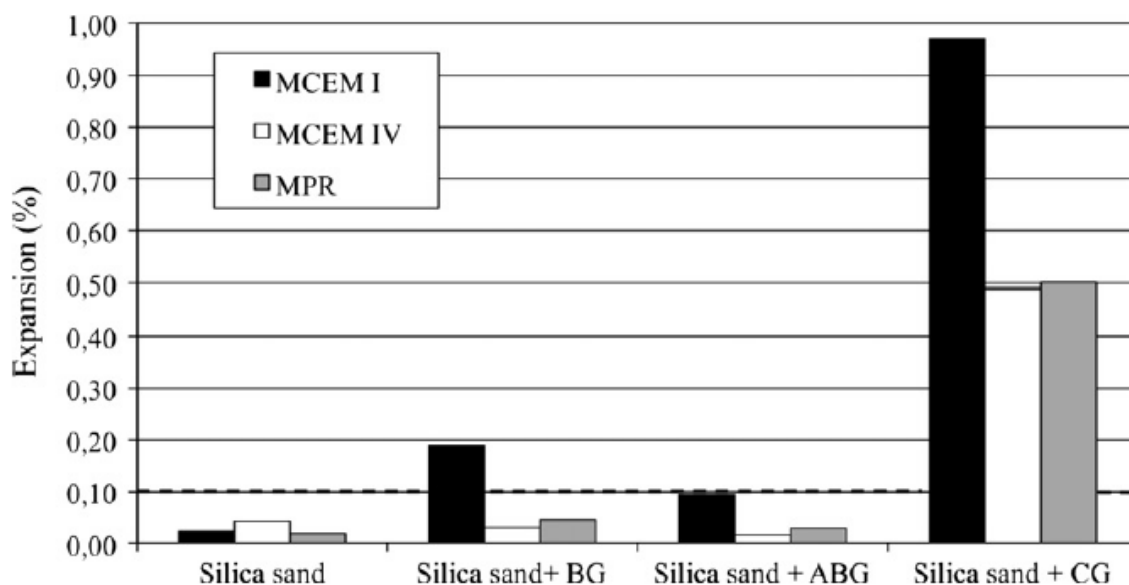


Bignozzi, Saccani (2012) em artigo publicado apresentou resultados do potencial de reatividade álcalis-sílica da ação combinada de diferentes resíduos de vidrados que substituem parcialmente areia natural com diferentes cimentos. A reação álcalis-sílica foi identificada entre alguns cimentos e os agregados miúdos (64 mm) de silicato de boro e vidro de silicato de chumbo. Um novo tipo de cimento resultante do CP I mais a mistura de um resíduo a base de silício proveniente de lamas produzidas pelo polimento de porcelana dos azulejos de grés, chamado como PR, também foi analisado para verificação do potencial de mitigação das expansões.

Os ensaios de reatividade acelerada obedeceram a C 1260 (ASTM, 1994), e os valores obtidos na Figura 2.20 são referentes as leituras das expansões até a idade de 14 dias. Foram moldados argamassas com cimento CP I, CP IV e CP I + 25% PR em composição com 04 tipos de composições de agregado miúdo: areia natural e areia natural comendo separadamente com resíduo de silicato de boro, âmbar de silicato de boro e silicato de chumbo. As substituições da areia natural em todos os casos foram de 25% em massa.

Segundo Bignozzi e Saccani (2012), as areias advindas dos vidros de silicato de chumbo e boro possui um teor elevado de íons como Pb^{2+} e B^{3+} que proporciona uma alta solubilidade do vidro que no ambiente do cimento conduz a um maior potencial de desenvolvimento dos produtos altamente expansivos. E isso foi observado nos ensaios de reatividade conforme a Figura 2.20.

Figura 2.20- Resultados do ensaio de reatividade acelerada pela C1260 (ASTM, 1994) realizado para os cimentos CP I, CP IV e CP I + 25% PR



As argamassas que foram moldadas com cimento CP IV (MCEM IV) e cimento composto com 25% em substituição de PR (MPR) obtiveram menores percentuais de expansão quando comparado com o cimento CP I (MCEM I), demonstrando que os mesmos conseguiram mitigar as expansões para quase todas as misturas, exceto para a composição com silicato de chumbo. Mesmo assim, as expansões apesar de serem superiores a 0,10%, limite da norma, obtiveram valores significativamente inferiores ao cimento CP I.

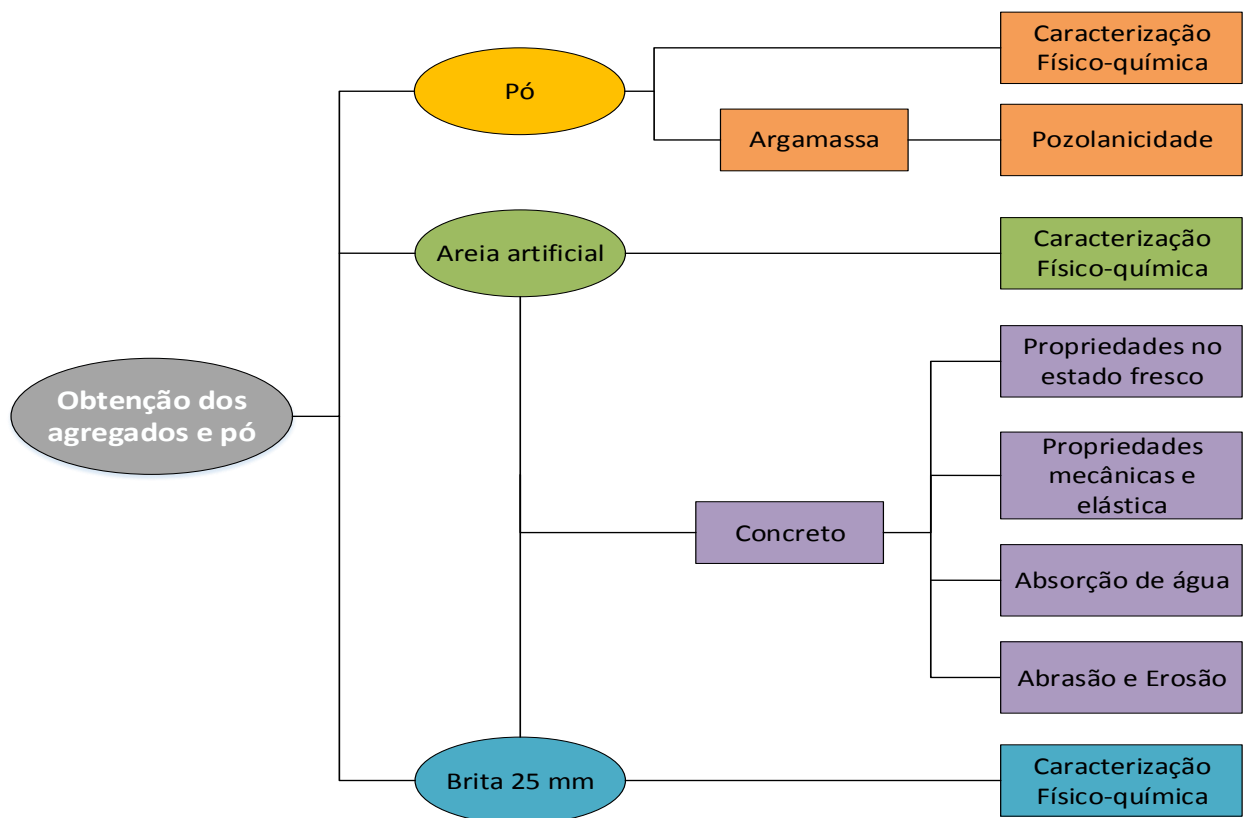
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são descritas as variáveis de estudo, os materiais e os métodos constantes no programa experimental.

3.1. VARIÁVEIS DA PESQUISA E DESCRIÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO

A presente pesquisa estudou várias frações obtidas do processamento do resíduo de porcelana dos isoladores elétricos a fim de possibilitar a maior incorporação possível do material no concreto, com o menor impacto em suas propriedades. Para essa aferição, foram executados diversos ensaios para caracterização dos materiais utilizados e do comportamento dos concretos produzidos com a utilização do resíduo em sua composição, em diferentes teores e formas de incorporação, como ilustrado pela Figura 3.1.

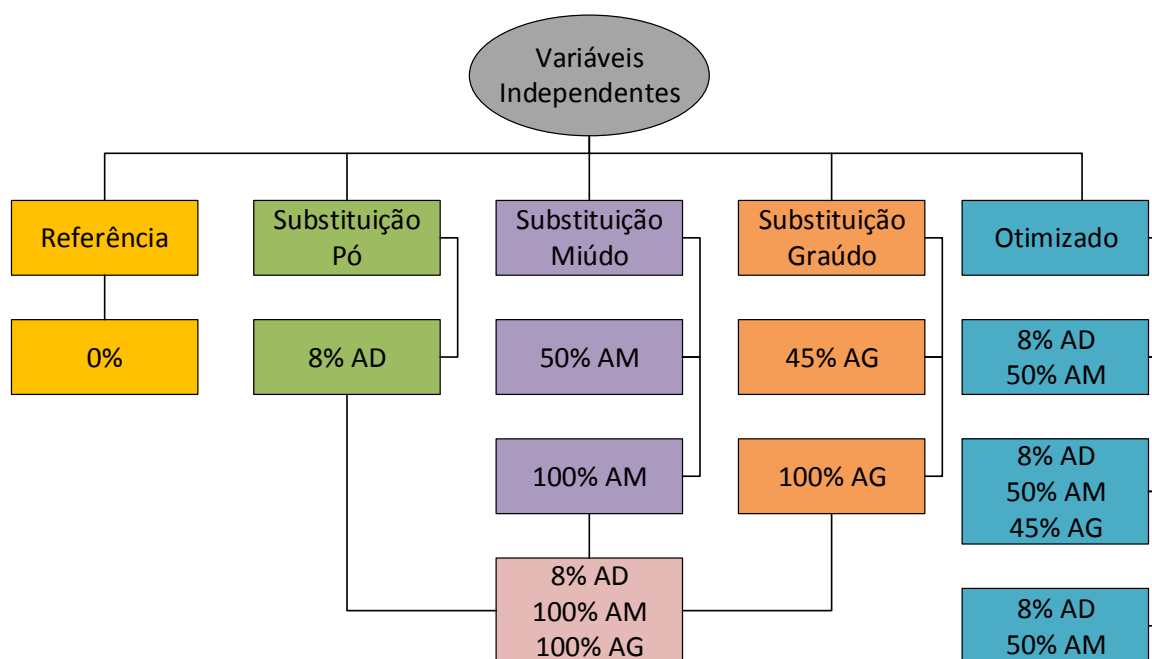
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa



As condições fixas estabelecidas no experimento foram o tipo de concreto, sendo definido o concreto bombeável com $115 \text{ mm} \pm 15 \text{ mm}$ de abatimento. Também foi fixada a dimensão máxima característica do agregado graúdo ($D_{\text{máx}}$), igual a 25 mm, o cimento utilizado, o CP IV 32, e relação água/cimento, igual a 0,55. As condições de produção do concreto e de confecção e cura dos corpos de prova (descritas mais adiantes) foram, também, constantes na pesquisa experimental.

Como variável independente foi estabelecido o percentual de resíduo para substituição. Os materiais obtidos do processamento do resíduo de porcelana foram incorporados nas misturas de concreto sempre por substituição parcial, em massa, das três frações dos materiais constituintes do concreto, a saber: a) na forma de pó, substituindo parte do cimento; b) na granulometria da areia, substituindo parcial e integralmente o agregado miúdo; c) e na granulometria da brita, substituindo parcial e integralmente o agregado graúdo. A disposição geral do experimento, com todas as variações propostas de emprego do resíduo no concreto, pode ser observada na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Fluxograma contendo a disposição geral do experimento



AD - Adição de pó de resíduo

AM - Substituição de Agregado Miúdo do Resíduo

AG - Substituição de Agregado Graúdo de Resíduo

As substituições apresentadas na Figura 3.2 são representadas por percentuais máximos de 100% para todos os agregados, para possibilitar a maior destinação possível do material

descartado, e em percentuais intermediários de 50% para o agregado miúdo e 45% para o agregado graúdo.

O valor intermediário para a areia foi determinado por meio de estudos com moldagem de argamassa e posterior ruptura aos 7, 28 e 91 dias, chegando-se ao maior valor de resistência à compressão com esse percentual (Anexo A). As argamassas foram moldadas em proporções de 25%-75%, 50%-50%, 75%-25%, 100%-0%, nas combinações entre o agregado artificial do resíduo e o agregado convencional natural, respectivamente. O proporcionamento utilizado foi de 1:3 (cimento:areia, em massa), utilizando o cimento CP IV-32, sem presença de aditivo, e com índice de consistência fixado em (190 ± 10) mm.

Quanto ao valor intermediário do agregado graúdo, este foi determinado por meio do melhor ajuste obtido entre o agregado convencional e o resíduo, utilizando-se diferentes proporções possíveis visando à maior aproximação à curva ideal de Talbot Richard. Esta curva, teoricamente, representa a máxima compacidade da mescla de agregados graúdos, ou seja, trata-se de uma curva na qual os agregados graúdos naturais e aqueles provenientes do resíduo vão apresentar o menor índice de vazios.

O percentual fino do resíduo (na forma de pó) em substituição ao cimento foi resultante de um estudo prévio em argamassas, no qual se variou o pó entre 0% e 12%, em uma mistura de referência produzida com cimento CP IV-32 e areia normal, numa proporção 1:3, em massa, e relação água/cimento 0,48. Corpos de prova cilíndricos foram, então, ensaiadas quanto à resistência à compressão nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, obtendo-se o maior valor aos 91 dias, com 8% de substituição de cimento pelo resíduo (Anexo A).

Os concretos estudados obtiveram uma variação na proporção entre volume de pasta x volume de agregado, variando com isso 1:m, mas permanecendo fixo a relação água cimento. Esta variabilidade foi necessária para que fosse possível a obtenção de concretos bombeáveis, questão não resolvida apenas com a utilização de aditivo superplastificante.

Como variáveis dependentes do estudo, as chamadas variáveis de resposta, foram definidas a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a absorção de água, a abrasão-erosão, sendo seus valores obtidos em variadas idades, por meio de ensaios normatizados.

3.2. MATERIAIS CONSTITUINTES E CONCRETOS ESTUDADOS

3.2.1. Resíduos das porcelanas

Para o desenvolvimento de toda a pesquisa, inicialmente foi necessária uma separação do material descartado, pois existem metais e outros tipos de resíduos incorporados à porcelana, que não participam do processo de reaproveitamento. Na Figura 3.3 (a) é possível visualizar os materiais descartados pelas subestações e usinas da empresa Eletrobras Furnas. A partir da separação, partiu-se para a produção do agregado graúdo de 25 mm, areia artificial e pó do resíduo, ilustrados pela Figura 3.3 (b), (c) e (d), respectivamente.

Figura 3.3 - Processamento do resíduo para suas diferentes incorporações no concreto

(a) Resíduo recebido para pesquisa



(b) Agregado 25 mm obtido do resíduo



(c) Areia artificial do resíduo



(d) Pó obtido da moagem do resíduo



Primeiramente foi realizada uma quebra manual das peças maiores com posterior fragmentação em britador de mandíbula. Ao final, procedeu-se à separação do material nas peneiras de abertura 25 mm a 4,8 mm, sendo que o material retido entre as faixas foi

classificado como agregado graúdo e o material passante na peneira 4,8 mm, porém retido na peneira nº 200 (de abertura 0,075 mm), foi classificado como areia artificial (oriunda do resíduo).

Para produção do pó do resíduo, isto é, para o processamento do material passante na peneira nº 200, procedeu-se à moagem do material, em duas etapas: a primeira utilizou um moinho de bolas de maior dimensão, sendo o procedimento executado por um período de 6 horas; e a segunda etapa empregou um moinho menor, com colocação particionada, em que foi realizada uma moagem total por 8 horas, o que corresponde a 13 000 giros no equipamento, de modo a se obter o material final. Esta segunda etapa teve como objetivo ajustar a finura para os padrões desejáveis de uso do resíduo em substituição ao cimento, compatíveis às adições minerais usualmente empregadas na tecnologia do concreto.

Na Tabela 3.1 estão apresentados os resultados de caracterização das amostras do material produzido na forma de pó, sendo a amostra 4, com dimensão média de 13,56 μm , o material definido para uso (e efetivamente empregado) em toda a pesquisa.

Tabela 3.1 - Caracterização físico-química das amostras do resíduo em pó

Amostras		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Massa específica (g/cm^3) – NBR NM 23/001		2,50	2,56	2,56	2,60
Área específica (m^2/g) – Método BET		-	0,79	2,66	1,63
Granulometria a laser – Dimensão média (μm):		80,20	27,81	14,39	13,56
Finura NBR NM 76/98 7676/9876/14	Blaine (g/cm^2)	-	2674	6852	6230
Componentes Químicos (%)	óxido de magnésio (MgO)	0,21			
	dióxido de silício (SiO_2)	68,83			
	óxido de ferro (Fe_2O_3)	1,67			
	óxido de alumínio (Al_2O_3)	17,12			
	óxido de cálcio (CaO)	1,87			
	Perda ao fogo	1,47			
	Equivalente alcalino	3,33			
	óxido de sódio (Na_2O)	1,24			
	óxido de potássio (K_2O)	3,18			
	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$		87,62		

Índices de Atividades Pozolânicas	Com a Cal (MPa) - NBR 5751/15	2,4	-	5,7	8,1
	Com Cimento (%) – NBR 5752/14	57,9	-	67,9	80,2
	Chapèlle Modificado – NBR 15895/10 (mg de Ca(OH) ₂ /grama)	-	-	-	502,96

Obs.: TiO₂ = 0,55%, ZnO = 0,10%, MnO = 0,02%, CuO = 0,005%, P₂O₅ = 0,16%, Cr₂O₃ = 0,06%, NiO = 0,01%

Pela análise da Tabela 3.1, em relação aos aspectos dimensionais do material fino, observou-se uma evolução da finura com o processo de moagem, sendo a amostra 3 o material que determinou o tempo de moagem necessário, e a amostra 4 ainda mais fina, resultante de vários ciclos de moagem, aglutinação e homogeneização, foi a usada para a produção da quantidade total de material utilizado na pesquisa.

Outro parâmetro importante no que tange ao material fino passível de substituição do cimento é a atividade pozolânica. Neste quesito, o resíduo alcançou, com a cal, um valor acima do limite estabelecido pela NBR 5751 (ABNT, 2015), que é de 6 MPa, e um índice de desempenho com o cimento um pouco abaixo dos 90%, estabelecido pela NBR 5752 (ABNT, 2014), atingindo 8,1 MPa e 80,2% de desempenho em relação a esses dois métodos, respectivamente. Para verificação do comportamento do resíduo ao longo do tempo, mesmo não sendo preconizado por norma, foi testado também o índice de desempenho (com o cimento) para 91 dias, obtendo-se o valor de 99,8%. Este valor demonstra um material com potencial para atividade pozolânica, o que levou à realização do ensaio de Chapèlle modificado, cujo resultado, igual a 502,96 mg de Ca(OH)₂ fixado por grama de material, ultrapassou o valor mínimo de 436 mg Ca(OH)₂/ grama de material estabelecido pela NBR 15895 (ABNT, 2010), que classifica um material como possuindo atividade pozolânica.

A análise química utilizando o equipamento de fluorescência de raio X, marca Thermo Fischer Scientific, modelo ARL Perform'x 4200, identificou dentre os compostos da Tabela 1, álcalis em percentuais significativos, demonstrando a necessidade de verificação do potencial de reatividade do material pela NBR 15577 (ABNT, 2008). A NBR 12653 (ABNT, 2014), que aborda os requisitos de aceitação química e física de materiais pozolânicos, enquadra o resíduo na classe N que são os materiais caracterizados por serem pozolanas naturais e artificiais. Para as propriedades elencadas na Tabela 3.2, apenas o índice de desempenho não foi atendido em 90%.

Tabela 3.2 - Requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014)

	Propriedades	Classe de material pozolânico		
		N	C	E
Químicos	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	≥ 70	≥ 70	≥ 50
	SO ₃ (%)	≤ 4	≤ 5	≤ 5
	Teor de umidade (%)	≤ 3	≤ 3	≤ 3
	Perda ao fogo (%)	≤ 10	≤ 6	≤ 6
	Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5
Físicos	Material retido na peneira 45 µm	< 20%	< 20%	< 20%
	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%
	Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa

As análises apresentaram para o resíduo valores de 87,62% para SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, óxido de sódio com valor de 1,24%, perda ao fogo 1,47%, atividade pozolânica com cal aos sete dias de 8,1 MPa, todos valores que atendem aos requisitos da Tabela 3.2.

3.2.2. Agregado miúdo

Os resultados dos ensaios físicos da areia natural utilizada e da areia artificial oriunda do resíduo estão discriminados na Tabela 3.3, juntamente com a normatização que estabelece as diretrizes para execução dos ensaios.

Tabela 3.3 - Caracterização física da areia

Determinação	Areia Artificial	Areia Natural	Métodos de Ensaio
Absorção (%)	0,10	0,30	NBR NM 30/2001
Módulo de Finura (M.F.)	3,23	2,62	NBR NM 248/2003
Massa Específica Aparente do Agr. Seco – (g/cm ³)	2,32	2,63	NBR NM 052/2009
Massa Espec. do Agr. Sat. Superfície Seca – (g/cm ³)	2,34	2,64	
Massa Específica – (g/cm ³)	2,37	2,66	
Material Pulverulento (%)	6,96	-	NBR NM 46/2003
Massa Unitária (kg/dm ³)	1459	-	NBR NM 45/2006

Os resultados de caracterização da areia proveniente do resíduo apresentam valores um pouco abaixo dos valores obtidos para areia natural utilizada no estudo, sendo essa tendência também verificada em outros estudos da literatura (FURNAS, 1997; SENTHAMARAI *et al.*, 2005; RIBEIRO *et al.*, 2014), o que pode ser algo benéfico, dependendo do parâmetro e fim almejado. Dos vários parâmetros medidos, cita-se o índice de 6,96% de material pulverulento,

o que o torna interessante para alguns tipos de concreto ou formas de aplicação, pois pode proporcionar trabalhabilidade e empacotamento à mistura.

3.2.3. Agregado graúdo

A caracterização física do agregado graúdo natural e da brita artificial produzida a partir do resíduo está apresentada na Tabela 3.4, juntamente com a normatização que estabelece as diretrizes para execução dos ensaios.

Tabela 3.4 – Caracterização física da brita de 25 mm

Determinação	Brita - Resíduo	Brita Natural	Métodos de Ensaio
Absorção (%)	0,3	0,4	NBR NM 53/2009
Módulo de Finura (M.F.)	6,61	6,95	NBR NM 248/2003
Abrasão Los Angeles (%)	21 “B”	24 “B”	NBR NM 51/2001
Índice de Forma (c/e)	2,10	2,60	NBR 7809/2006
Massa Específica S.S.S.(g/cm ³)	2,47	2,70	NBR NM 53/2009
Ciclagem acelerada Etileno Glicol (%)	0,02	0,06	NBR 12697/1992
Sanidade ao Ataque de Na ₂ SO ₄ (%)	0,04	0,13	ASTM C-88/2013
Ciclagem acelerada Água-Estufa (%)	-	0,09	NBR 12696/1992
Material Pulverulento (%)	0,39	-	NBR NM 46/2003
Massa Unitária (kg/dm ³)	1393	-	NBR NM 45/2006

Para o agregado graúdo, foi verificada a mesma tendência geral constatada para o agregado miúdo, ou seja, os valores encontrados para a brita produzida com o resíduo foram um pouco abaixo daqueles encontrados para a brita natural, o que em alguns casos pode ser benéfico, como para concretos que necessitam ser mais leves ou naqueles que exigem um agregado mais resistente e menos friável. Salienta-se que para os ensaios de avaliação da qualidade do agregado, como sanidade ao ataque de Na₂SO₄, ciclagem acelerada etileno glicol, água estufa e abrasão Los Angeles, todos os resultados foram satisfatórios para o agregado de resíduo de porcelana, o que o enquadra dentro desses padrões de qualidade e durabilidade.

3.2.4. Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland pozolânico CP IV 32, cuja caracterização físico-química está apresentada na Tabela 3.5, juntamente com os parâmetros de norma NBR 5736/1991.

Tabela 3.5 - Caracterização físico-química do cimento CP IV 32

Tipo de Material		CP IV	Limites Norma NBR 5736/91	
Propriedades Determinadas				
Massa Específica (g/cm ³) - NBR NM 23/001		3,07	---	
Finura – NBR 12826/	Retido na # 200 (%)	2,55	≤ 8,0	
	Retido na # 325 (%)	15,29	---	
Área Específica - Blaine (cm ² /g) – NBR NM 76/98		5.470	---	
Tempo de Pega (h:min) NBR NM 65/02	Início (h:min)	03:10	≥ 1:00	
	Fim (h:min)	04:30	≤ 12:00	
Água de Consistência - Pasta (%) – NBR NM 65/02		34,6	---	
Expansão em Autoclave - Norma ASTM C-151 (%)		-0,016	≤ 0,8	
Resistência à Compressão (MPa) – NBR 7215/96	3 dias	27,7	≥ 10,0	
	7 dias	37,7	≥ 20,0	
	28 dias	41,6	≥ 32,0 e ≤ 49,0	
	90 dias	43,5	≥ 40,0	
	Resíduo insolúvel (%)		29,47	---
	Trióxido de enxofre (SO ₃)		3,14	≤ 4,0
	Óxido de magnésio (MgO)		2,77	≤ 6,5
	Dióxido de silício (SiO ₂)		32,90	---
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,90	---
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		10,69	---
	Óxido de cálcio (CaO)		43,60	---
	Óxido de cálcio livre (CaO)		1,06	---
	Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,19	---
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,68	---
		Equiv. alcalino	0,64	---
	Álcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,09	---
Óxido de potássio (K ₂ O)		0,33	---	
Equiv. alcalino		0,31	---	
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		5,34	---	

Pela Tabela 3.5 fica evidente que o cimento utilizado na pesquisa foi o pozolânico, com percentual de pozolana aproximadamente de 29%, sendo que todos os parâmetros exigidos pela NBR 5736 (ABNT, 1991) foram atendidos, incluindo-se os valores mínimos de resistência à compressão. Também não houve evidências visuais ou por meio do valor de perda ao fogo de uma possível hidratação e os percentuais dos compostos químicos estão dentro da normalidade esperada.

3.2.5. Concretos produzidos

Para determinação do proporcionamento dos materiais naturais e taxas de substituição do resíduo, foi seguido o projeto piloto para otimização dessas proporções a fim de se chegar em resultados mais otimizados quanto possível.

Na pesquisa foi moldado concreto bombeável para a dimensão máxima característica ($D_{máx}$) 25 mm, estabelecendo-se uma relação água cimento de 0,55 e uma faixa de abatimento de tronco de cone de $11,5 \pm 1,5$ cm, com a utilização do cimento CP IV 32, aditivo superplastificante, areia natural, areia artificial do resíduo, brita natural e brita do resíduo.

A nomenclatura utilizada para identificação dos concretos foi adotada referenciando a quantidade de resíduo substituído, sendo AD em adição, AM em agregado miúdo e AG em agregado graúdo. O percentual de substituição em massa está apresentado antes das nomenclaturas AD, AM e AG respectivamente.

Na Tabela 3.6 e 3.7 estão as dosagens moldadas para estudo das propriedades propostas.

Tabela 3.6 – Dosagens utilizadas na pesquisa

Tipo de concreto		REF	100AM 100AG	100AM	50AM	8AD	45AG
Traço em Peso - 1:		5,855	3,84	4,843	5,017	5,855	5,504
Dados de Composição	Cimento equivalente	314	386	348	342	318	326
	Cimento	0	0	0	0	289	0
	Adição	0	0	0	0	25	0
	Água	173	212	191	188	175	179
	Areia Natural	715	0	0	351	725	712
	Areia Artificial	0	612	655	351	0	0
	Brita 25 mm	1123	0	1029	1015	1139	595
	Brita 19 mm	0	870	0	0	0	486
	Aditivo Superplastif.	0,942	1,543	2,087	0,753	0,637	0,000
	Relação a/c	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
	% argamassa s/ ar	54,7	59,1	57,5	57,8	55,5	55,6
	% argamassa c/ ar	58,2	64,3	61,6	62,3	57,8	58,3
	Módulo Finura	5,266	5,104	5,526	5,316	5,266	5,076
	% argamassa seca	47,8	53,4	49,3	50,7	47,8	48,9
	Vol. de agregado (dm ³)	685	602	649	651	694	685
% de areia em massa	38,9	41,3	38,9	40,9	38,9	39,7	
% de areia em volume	39,3	41,5	41,2	42,3	39,3	39,1	
Propriedades do Concreto Fresco	Abatimento (cm)	130,0	120,0	120,0	100,0	120,0	130,0
	Ar incorporado	3,0	4,2	3,5	4,2	2,4	2,7
	Massa unitária (kg/m ³)	2318	2069	2217	2244	2358	2298

Tabela 3.7 – Dosagens utilizadas na pesquisa (continuação)

Tipo de concreto		100AG	8AD 50AM 45AG	8AD 100AM 100AG	8AD 50AM	50AM 45AG
Traço em Peso - 1:		4,531	4,409	3,97	5,017	4,409
Dados de Composição	Cimento equivalente	363	366	367	341	362
	Cimento	0	333	333	310	0
	Adição	0	29	29	27	0
	Água	200	202	202	188	199
	Areia Natural	653	334	0	350	330
	Areia Artificial	0	334	601	350	330
	Brita 25 mm	0	522	0	1011	515
	Brita 19 mm	992	427	855	0	422
	Aditivo Superplastif.	1,089	0,403	0,844	0,614	0,362
	Relação a/c	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
	% argamassa s/ ar	56,7	58,6	57,0	57,6	57,9
	% argamassa c/ ar	59,9	63,5	65,3	62,6	63,7
	Módulo Finura	4,887	5,149	5,104	5,316	5,149
	% argamassa seca	50,6	52,1	53,1	50,7	52,1
	Vol. de agregado (dm ³)	647	628	592	649	620
% de areia em massa	39,7	41,3	41,3	40,9	41,3	
% de areia em volume	37,9	41,7	41,5	42,3	41,7	
Propriedades do Concreto Fresco	Abatimento (cm)	120,0	130,0	100,0	125,0	115,0
	Ar incorporado	3,4	5,2	8,0	5,0	5,6
	Massa unitária (kg/m ³)	2210	2187	2022	2240	2154

Para ajustar as dosagens partiu-se das condições extremas, que foi o referência (REF), isto é, aquele que não utiliza a porcelana, e posteriormente o concreto com substituição completa por resíduo (8%AD100%AM100%AG). Salienta-se que para garantir a trabalhabilidade e consistência necessária para o concreto no estado fresco, foi necessário variar a relação pasta/agregado, para se manter a relação água cimento.

3.3. MÉTODOS EMPREGADOS

Neste tópico são apresentados os métodos utilizados para aferição das propriedades dos materiais. Os métodos foram divididos nos relacionados à caracterização do resíduo propriamente dito e os métodos de avaliação dos concretos, tanto no estado fresco quanto endurecido.

3.3.1 Métodos de caracterização especial do resíduo

Para a caracterização do resíduo foram conduzidos diversos ensaios convencionais, como a microscopia eletrônica de varredura, e alguns menos comuns, como a difração de raio X, o

índice de atividade pozolânica – Chapelle modificado, reatividade álcali-agregado pelo método acelerado.

3.3.1.1 Difração de raio X

A técnica de difração de raio X é importante para identificação das estruturas cristalinas e verificação da fase amorfa nas amostras de pó do resíduo, possibilitando, em função do grau de organização das estruturas identificadas, inferir um potencial de reatividade do material. A análise foi realizada em difratômetro de raios X, marca Siemens, modelo D5000, voltagem 40KV e amperagem de 30 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,05°/seg, de 3° a 70° 2 θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda (λ) são: K α 1,5418 Å e K β 1 1,3922 Å.

As interpretações foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se software para captura de dados Diffrac Plus versão de 2009. Para interpretação de dados, Software EVA, versão 2009, com banco de dados de 2009 do International Centre for Diffraction Data (ICDD).

As amostras secas foram submetidas à desagregação com o uso de moinho orbital até obtenção de 100% do material passante na peneira de 325 mesh Tyler (0,043mm). Concluída esta etapa, parte do material foi analisada no Difratômetro de Raios X pelo Método do Pó Não-Orientado.

Deve-se ressaltar que o limite de detecção do método, nas condições usuais de trabalho, é de 5%, ou seja, constituintes que ocorram na amostra abaixo deste limite podem não ser captados.

3.3.1.2 Índice de atividade pozolânica – Chapelle modificado

A análise por Chapelle modificado, preconizada pela NBR 15895 (ABNT, 2010), complementa as determinações para avaliação da interação adição e cimento, contribuindo para verificação da pozolanidade do material. O ensaio determina o teor de hidróxido de cálcio fixado pelo material testado. O método consiste em manter sob agitação a 90°C durante 16 horas uma solução com 2 gramas de óxido de cálcio, 1 grama de material pozolânico e 250 gramas de água. Após resfriamento, acrescenta-se solução de sacarose e agita-se por 15

minutos. Após filtragem e titulação com HCl usando solução de fenolftaleína, calcula-se a quantidade de CaO fixada pelo material pozzolânico.

3.3.1.3 Reatividade álcali-agregado pelo método acelerado

O resíduo foi verificado quanto à potencialidade de reatividade álcali-agregado por meio da NBR 15577 (ABNT, 2008) parte 1, 4 e 5, onde se preconiza a moldagem de barras de argamassa com dimensões 25 mm x 25 mm x 285 mm, as quais são colocadas em tanques com solução de hidróxido de sódio a 80°C, durante todo o período de leitura das expansões das barras, que se estende por até 30 dias.

As medições das barras foram realizadas em aparelho comparador de comprimento com relógio comparador, capaz de medir variações totais de pelo menos 5,0 mm; foram moldados 3 barras de argamassas para cada verificação entre material cimentante e agregado, sendo o resultado a média das expansões.

3.3.1.4 Análise por microscopia eletrônica de varredura

As amostras destinadas a análise por microscopia foram obtidas pela definição de regiões de interesse e quebra, originando-se fragmentos que receberam metalização com uma camada de ouro, por não serem condutores de elétrons, e então analisados ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), o qual possibilitou a observação e análise da superfície de amostras através de imagens tridimensionais. O equipamento usado foi da Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica da Eletrobras Furnas, sendo da marca Leica, modelo S440i - 1995, de alto vácuo, com EDS da Oxford.

3.3.2 Métodos de avaliação dos concretos

Os métodos de avaliação dos concretos abrangeram as propriedades do concreto fresco por meio de sua caracterização reológica, e do endurecido, por meio da aferição de suas propriedades mecânicas, elásticas e de durabilidade.

3.3.2.1 Caracterização reológica do concreto fresco

A caracterização reológica do concreto no estado fresco foi realizada por meio de reômetro fabricado pela Siranda de Projetos e Tecnologia Ltda, modelo SCI-R, o qual aferiu sua viscosidade e tensão de escoamento das amostras de concreto.

3.3.2.2 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm e ensaiados nas idades de 8, 28 e 90 dias.

3.3.2.3 Módulo de elasticidade

Para determinação do módulo de elasticidade foram utilizados os procedimentos prescritos na NBR 8522 (ABNT, 2008). Os ensaios foram realizados com o extensômetro do tipo LVDT (*Linear Variation Displacement Transducer*) para medir as deformações, em corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 cm x 20 cm e ensaiados nas idades de 7, 28 e 90 dias.

3.3.2.4 Absorção de água

Os ensaios foram realizados conforme o método da NBR 9778 (ABNT, 2005), e consiste em determinar a quantidade de água absorvida até a saturação do corpo de prova. São necessários 02 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm para todas as idades.

O método consiste em secar a amostra e determinar sua massa na condição seca e posteriormente saturar a amostra e determinar sua massa na condição saturada e imersa em água.

3.3.2.5 Abrasão-erosão

Este método de ensaio seguiu o procedimento interno da Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica da empresa Eletrobras Furnas S.A, sendo baseado no trabalho de Braga *et al.* (1983).

O ensaio resume-se na avaliação da perda de massa do material analisado causada pela abrasão de esferas de aço imersas em água sobre a superfície de corpos de prova cilíndricos

(pastilhas de 30 cm de diâmetro e 5 cm de altura). Para tanto foi utilizado o equipamento que consiste de um cilindro de aço com tampa, motor elétrico, polias, correia, paleta agitadora, e esferas de aço, o qual o conjunto tem a função de transladar esferas juntamente com a água sobre a superfície da amostra, obtendo-se a perda da massa do corpo de prova antes e após 24, 48 e 72 horas de execução do ensaio. Os resultados foram então calculados em percentual de perda de massa em relação à massa inicial da pastilha a partir da moldagem de 2 corpos de prova por dosagem que deverão ser ensaiados nas idades de 28 e 91 dias.

3.3.2.6 Análise estatística dos resultados

Para um melhor entendimento do comportamento das variáveis independentes e seus efeitos nas propriedades estudadas, foi empregada a análise estatística de variância (ANOVA), segundo o modelo descrito na equação 3.1, a qual expressa o modelo estatístico genérico, conforme Nanni e Ribeiro (1987):

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (3.1)$$

Onde

μ = média geral;

α_i = influência da variável independente substituição do resíduo;

β_j = influência do variável independente idade do ensaio;

$\alpha\beta_{ij}$ = influência da interação das variáveis independentes;

ϵ_{ij} = medida do erro experimental, onde $\epsilon_{ij} \rightarrow N(0, \sigma)$.

Salienta-se que os projetos fatoriais são mais eficientes do que os experimentos simples, pois permitem tirar conclusões mais gerais, por meio de análise das interações das variáveis estudadas, e não apenas dos efeitos individuais destas.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item estão apresentados e discutidos os resultados obtidos do programa experimental. Inicialmente apresentam-se as análises realizadas no resíduo, em termos de sua caracterização físico-química, e, posteriormente, estão apresentados os resultados das propriedades do concreto fresco e endurecido.

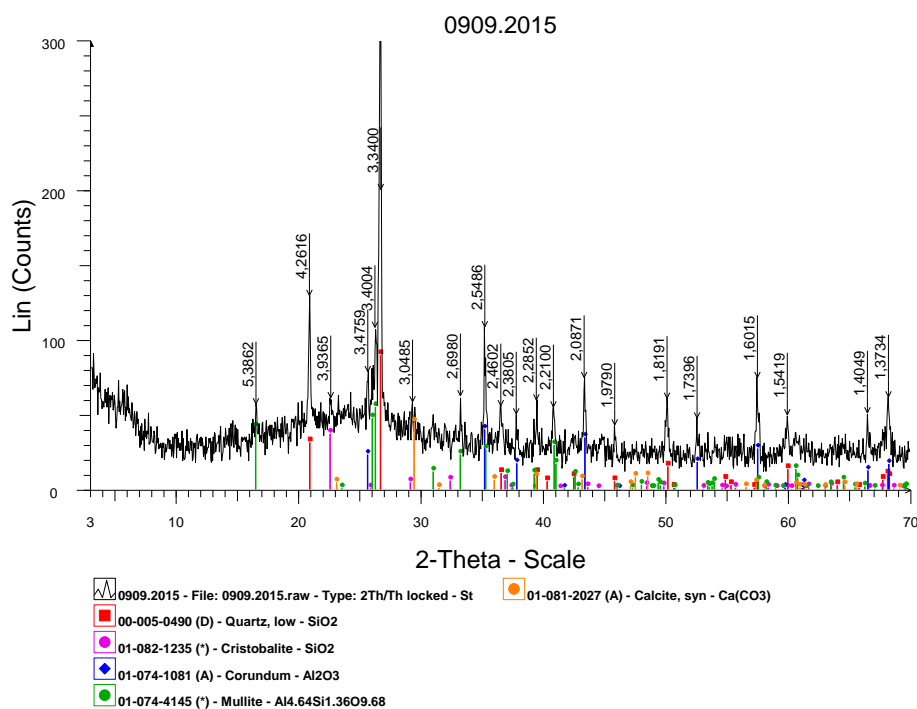
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO

Em relação à caracterização do resíduo proveniente das porcelanas dos isoladores, inicialmente têm-se os resultados da caracterização mineralógica realizada no material por meio da técnica de difração de raios X. Em seguida, procedeu-se a uma caracterização microestrutural do material por meio de microscopia eletrônica de varredura e, por fim, realizou-se a verificação do potencial de reatividade álcali-agregado do resíduo em presença de cimento pozolânico.

4.1.1 Difração de raios X

A análise por difração de raios X resultou no difratograma apresentado na Figura 4.1, em que podem ser visualizadas várias fases cristalinas, sendo o quartzo a fase predominante, e como secundário o coríndon, mulita, traços de cristobalita e calcita. Apesar da técnica em questão ser qualitativa, em função de uma avaliação da cristalinidade e intensidade de pico, é possível determinar as fases predominantes. O quartzo e a cristobalita são variações de arranjos da sílica (dióxido de silício), enquanto o coríndon (Al_2O_3) tem base em alumina e a mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) um sílico-aluminato. Destaca-se que o fundo (*background*) do difratograma apresentou uma pequena fase amorfa, não mensurável pela metodologia aplicada. Sendo assim, o material é predominantemente cristalino, o que diminui a potencialidade de apresentar reações propensas as adições.

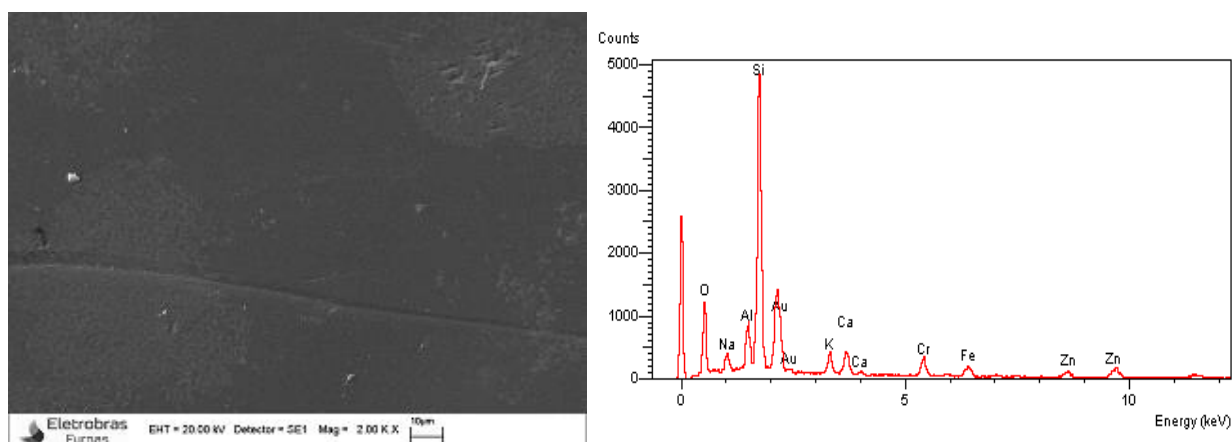
Figura 4.1 - Difratoograma de raios X da amostra utilizada na pesquisa



4.1.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura

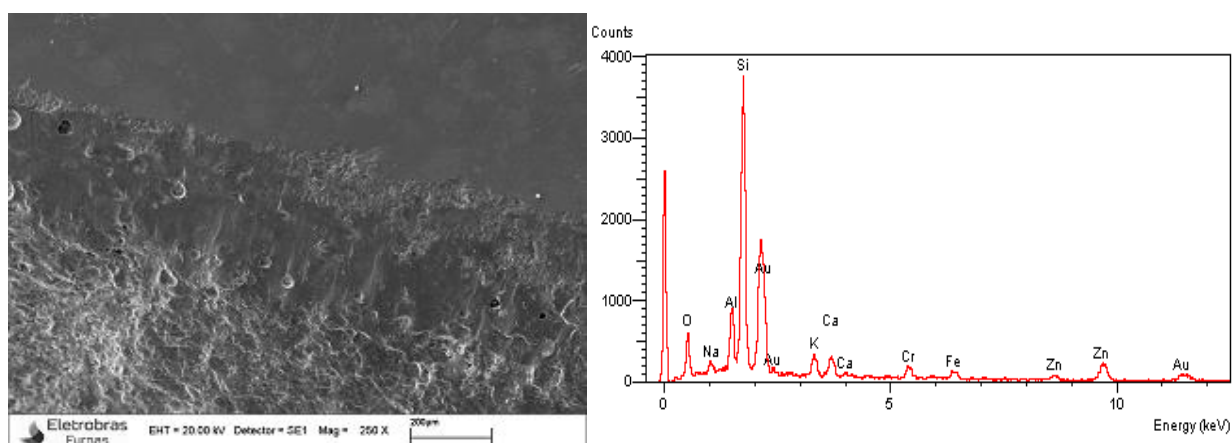
Com investigações pelo MEV, acompanhadas de microanálises por EDS (espectrometria por energia dispersiva de Raios-X), foi possível verificar tanto aspectos gerais da microestrutura do material como os elementos presentes no resíduo (em regiões específicas analisadas). Na região esmaltada do resíduo, foi verificada uma superfície lisa e vitrificada, quase ausente de porosidade e sem pontos de ancoragem, apresentando os elementos silício, sódio, potássio, e cálcio, como pode ser verificado na Figura 4.2. Esses elementos aparecem na constituição devido aos constituintes principais das matérias-primas utilizadas na fabricação das porcelana dos isoladores, que são as argilas brancas e o feldspato (ABCERAM, 2016). As argilas brancas são constituídas por argilominerais, como a caulinita de composição $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, e feldspato de composição potássico ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) e o sódico ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) (SOUZA SANTOS, 1992; ABCERAM, 2016). Mediante a queima para a produção da porcelana, ocorrem transformações físico-químicas envolvendo essas matérias-primas, aparecendo então as fases que contêm esses elementos, como visto no tópico anterior.

Figura 4.2 - Micrografia destacando uma superfície muito lisa e vitrificada, com EDS da parte esmaltada do resíduo



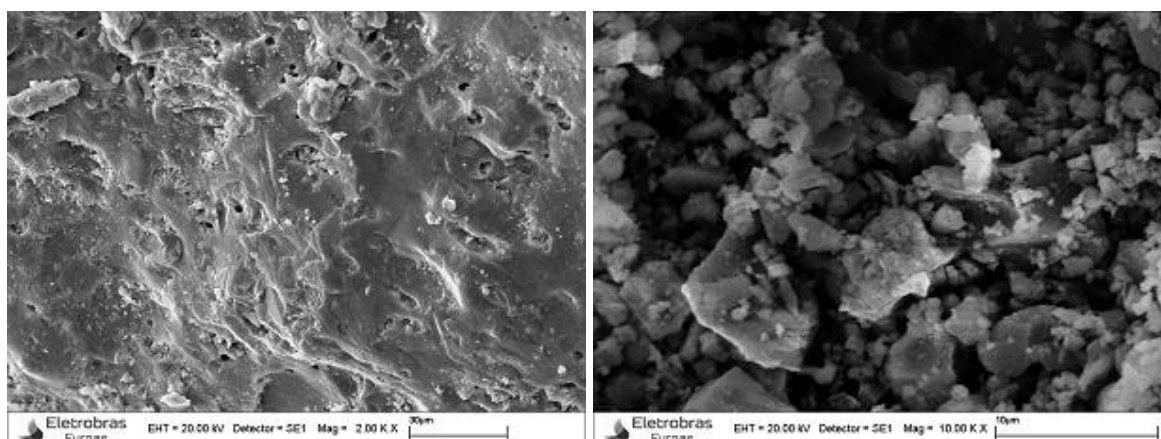
Verificando-se a região de transição entre o esmalte e a parte interna do resíduo, foi encontrada uma parte lisa e outra interna com certa porosidade, possuindo uma área intermediária de transição. Os elementos encontrados pelo EDS na parte intermediária foram os mesmos encontrados na parte esmaltada, Figura 4.3, inferindo-se assim uma homogeneidade no resíduo no que se refere à sua composição química e mineralógica.

Figura 4.3 - Micrografia e EDS da parte transição entre o esmalte e a parte interna do resíduo



No que se refere a micrografia da Figura 4.4 (a), referente a superfície do agregado, é possível observar uma estrutura com poros bem distribuída e provavelmente sem conexões, similar às observações realizadas por Halicka *et. al.* (2013) na superfície da porcelana do resíduo dos vasos sanitários. Na Figura 4.4 (b) a imagem revela a morfologia do pó do resíduo, apresentando bastante similaridade a morfologia do agregado graúdo quanto à forma irregular.

Figura 4.4 - Micrografia (a) do agregado e (b) do pó do resíduo



4.1.3 Reatividade álcali-agregado pelo método acelerado

Para utilização do resíduo é primordial a realização de ensaios para verificação do potencial reativo do agregado quanto à reação álcali-agregado, efetuando-se então moldagens de amostras contendo o resíduo juntamente com o cimento padrão, que possui características de alto teor de álcalis, a fim de desencadear a reação (caso o agregado do resíduo seja reativo). Em análises similares, Portella *et. al.* (2006) identificaram a expansibilidade do resíduo de porcelana utilizado em sua pesquisa, sendo que a maior influência foi da própria massa do corpo da porcelana moída com maior concentração de sílica amorfa reativa, e nem tanto do esmalte.

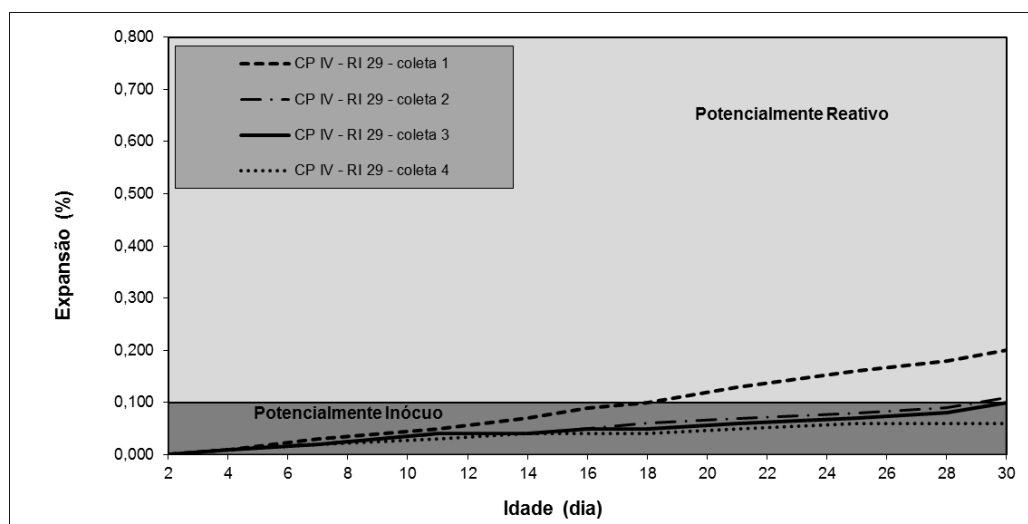
Com a condução do ensaio preconizado pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008), verificou-se que as expansões do resíduo das porcelanas dos isoladores em combinação com o cimento alto teor de álcalis, apresentaram aos 30 dias valores bem significativos, da ordem de 1,46% (vide Anexo B), ultrapassando o limite da norma NBR 15577-1 (ABNT, 2008), a qual estabelece que para o material ser considerado potencialmente inócuo, o resultado das expansões não devem ultrapassar 0,19%.

Após a identificação das expansões do resíduo dos isoladores, foi realizada uma análise com a finalidade de se combater as expansões evitando assim a ocorrência de patologias no concreto. Diante disto, como é conhecido que o cimento pozolânico CP IV possui esta potencialidade de mitigação do RAA e verificando que realmente ocorre o efeito mitigador em materiais similares como o resíduo dos porcelanatos (BIGNOZZI; SACCANI, 2012),

determinou-se a verificação dos resíduos das porcelanas na presença do cimento CP IV com resíduo insolúvel de 29% (pozolana calcinada).

Para a fase de avaliação do poder mitigador do cimento foi utilizado os parâmetros relacionados para verificação de materiais inibidores das expansões preconizado na Tabela 3 da norma NBR 15577-1 (ABNT, 2008), no qual estabelece que as expansões não deverão ultrapassar 0,10% aos 16 dias. E os resultados dos ensaios apresentados na Figura 4.5 demonstraram que o cimento CP IV com aproximadamente 29% de pozolana desempenhou o papel mitigador não ultrapassando 0,10%, inclusive para todas as coletas realizadas em diferentes lotes de resíduo.

Figura 4.5 - Expansões dos cimentos em combinação com resíduos de diferentes pontos de coleta



O motivador das diferentes coletas foi testar o material, levando em consideração uma possível variabilidade do resíduo frente as diversas origens.

Os resultados das expansões apresentaram uma curva de crescimento com certa variabilidade, mas todas com a mitigação das expansões. Parte dessa variabilidade pode estar ligada ao ensaio, mas, também, pode ser devida à própria composição do material em função das diferentes porcelanas utilizadas para diversos fins no sistema de geração e transmissão de energia. De toda maneira, com o cimento empregado, verificou-se a mitigação do processo de reação álcali-agregado, o que credencia o uso do resíduo nos concretos, porém com as devidas ressalvas de um uso específico de cimento ou de outras ações mitigadoras.

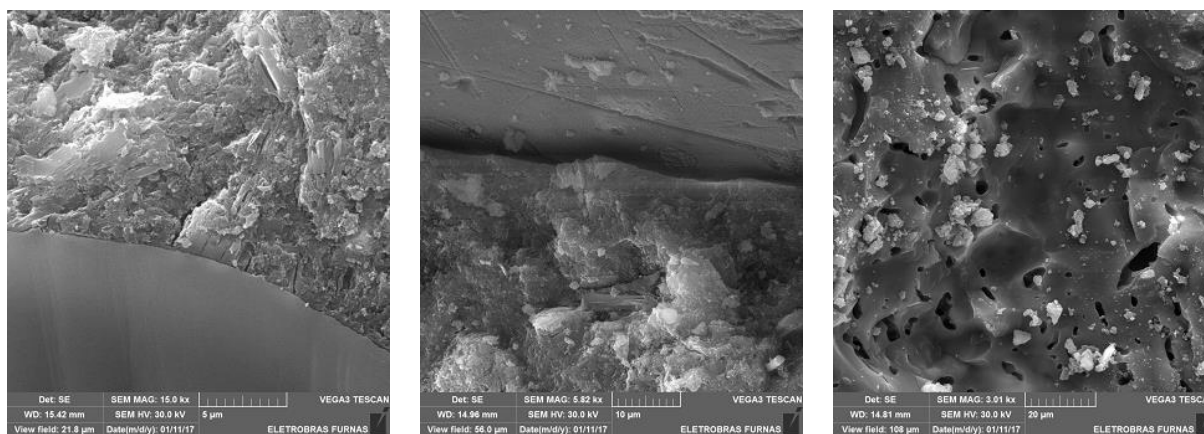
4.2. RESULTADOS DO CONCRETO

Os ensaios nos concretos foram realizados em 11 tipos de concreto moldados para os diversos percentuais de substituição, levando em consideração os resultados obtidos do estudo piloto com argamassa apresentados no Anexo A. As idades de controle foram 8, 28 e 91 dias e a relação água/cimento estipulada para todas as dosagens foi igual a 0,55. Todos os valores individuais dos ensaios para as propriedades estudadas estão apresentados no Anexo C.

4.2.1 Análise da microestrutura do concreto por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

As amostras foram fraturadas para análise da microestrutura dos concretos pelo microscópio eletrônico de varredura, com imagens geradas por sinais de elétrons secundários. Na Figura 4.6 (a), verifica-se uma zona de transição entre o agregado de resíduo e a pasta cimentícia bastante densificada, corroborando para os resultados obtidos para as diversas propriedades para o concreto referência. Já para o concreto produzido com o resíduo, é verificada uma zona de transição mais enfraquecida, Figura 4.6 (b), com um distanciamento do agregado da pasta, provocando uma região mais vulnerável, confirmada pelos resultados obtidos em todas as propriedades analisadas. Na Figura 4.6 (c) é possível observar que a pasta ancorou dentro dos poros, mas ao redor criou-se uma região mais lisa. Provavelmente esses poros arredondados e os irregulares internos contribuem para contrabalancear a superfície lisa das partes esmaltadas.

Figura 4.6 - Micrografia do concreto – (a) ZT do concreto referência; (b) ZT do concreto utilizando o resíduo como agregado; (c) ancoragem da pasta no agregado artificial



Um distanciamento mais pronunciado do agregado de porcelana com esmalte em relação a pasta, foi identificado nas micrografias realizadas em amostras de argamassa analisadas na tese de Campus (2011), observadas em imagens de partículas maiores do agregado miúdo de porcelana, pois o processo de fabricação dos isoladores favorece a presença de agregados em formato lamelares quando comparado com alguns agregados miúdos convencionais.

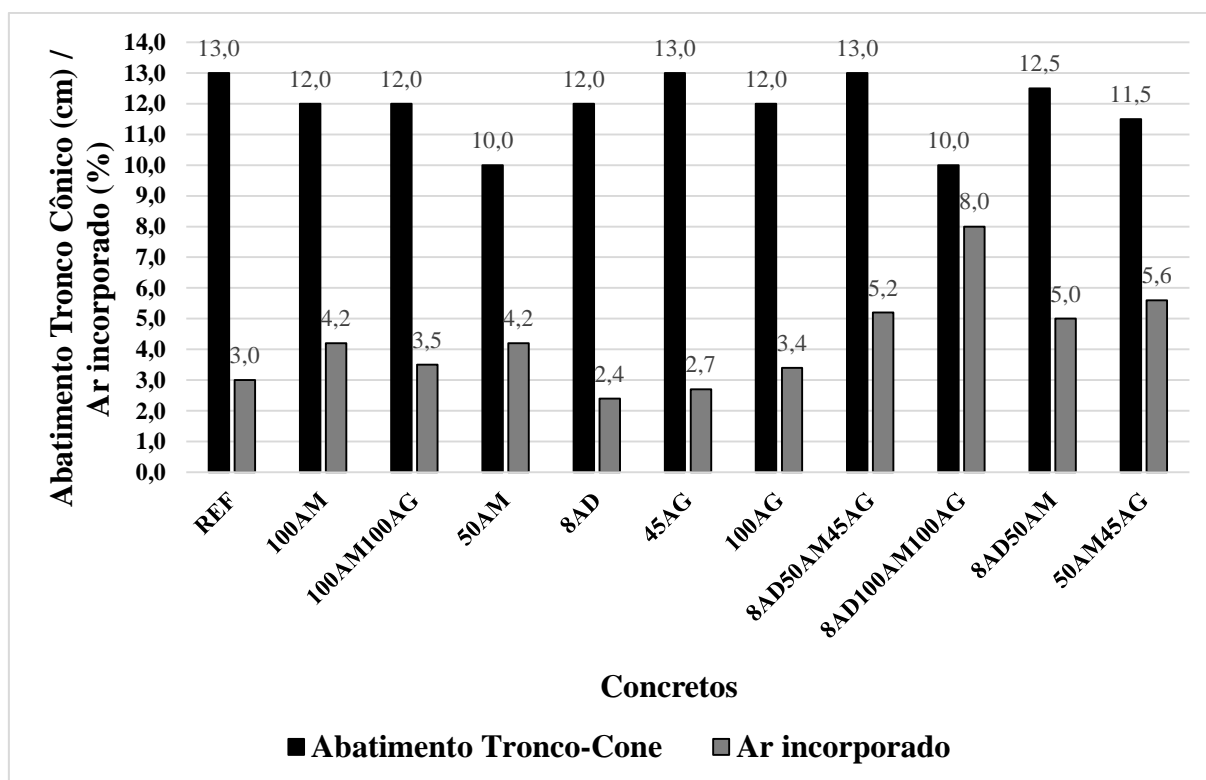
Em ambas as amostras desta pesquisa, com agregado convencional e utilizando resíduo, foram identificadas morfologias de compostos de hidratação comuns em pastas de cimento hidratado, como etringita, C-S-H e portlandita.

4.2.2 Propriedades do concreto no estado fresco

Os concretos utilizados na pesquisa foram ajustados para obtenção de parâmetros de suas propriedades no estado fresco para aplicação utilizando bombas, pois é a forma mais empregada em estruturas convencionais devido à alta velocidade na execução do serviço. Para analisar o potencial de bombeamento do concreto, foram realizados os ensaios de abatimento tronco de cone e reometria.

Visualmente, foi possível observar aspectos bem semelhantes de coesão e argamassa de envolvimento dos agregados nos ensaios de abatimento de tronco de cone. Os concretos variaram os valores entre 100 e 130 mm, valores satisfatórios quando se tem o objetivo de aplicação como concreto bombeável. Na Figura 4.7 estão os valores individuais de abatimento e teor de ar, características que influenciam tanto o concreto no estado fresco quanto endurecido.

Figura 4.7 - Valores obtidos dos ensaios de abatimento tronco de cone e teor de ar das diferentes dosagens produzidas.

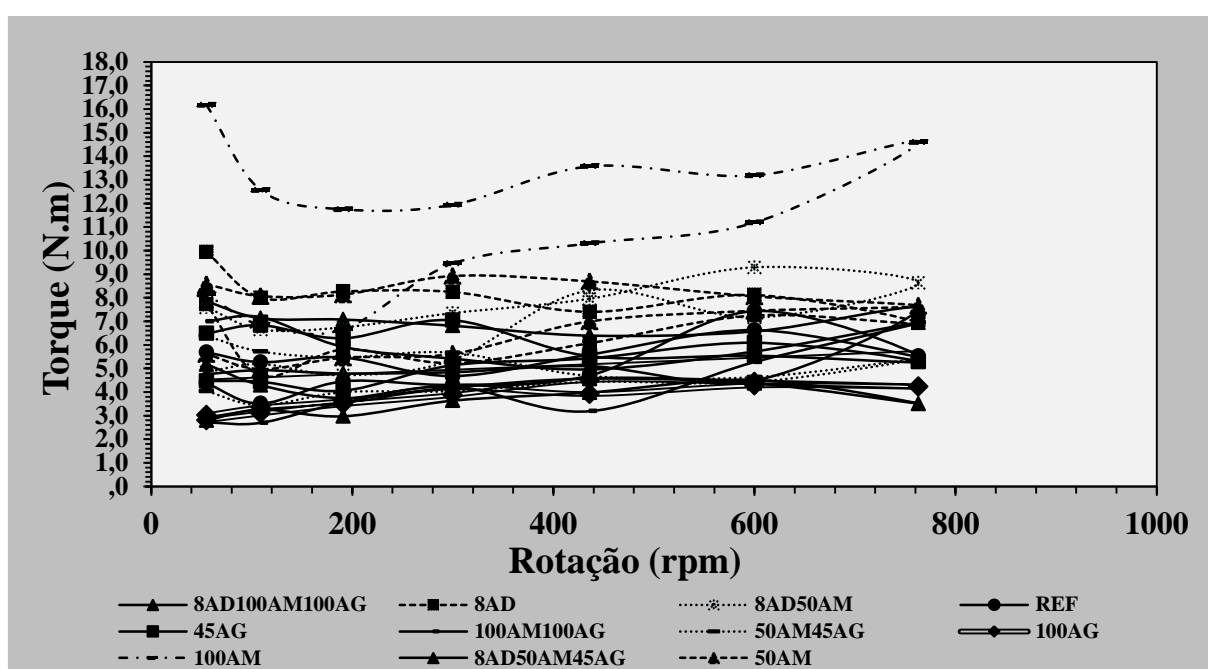


De forma geral os concretos tiveram uma variação significativa em termos de ar incorporado, atribuindo-se este comportamento à interação entre os materiais envolvidos em cada proporcionalamento e ao aditivo utilizado. Tendo em vista esse resultado, é importante dar atenção na utilização do resíduo como insumo ao concreto para não permitir que o ar incorporado interfira nos resultados das propriedades do concreto endurecido, pois valores acima de 5%, como o obtido para o concreto 8AD100AM100AG, podem impactar nos valores de resistência devido ao comprometimento da propriedade pelo aumento da porosidade.

Com o intuito de se chegar à verificação e confirmação de similaridade entre os concretos quanto à bombeabilidade, foi realizado uma verificação do comportamento do concreto no estado fresco por meio da análise de parâmetros reológicos, com o uso de um reômetro. Este cuidado é resultante dos ajustes que foram necessários para garantia da trabalhabilidade, referente ao balanceamento entre volume de agregado total e pasta, que objetivaram produzir concretos com aplicabilidade o mais próximo possível do referênci e com a funcionalidade estrutural.

Na Figura 4.8 estão expostos os gráficos obtidos pelo reômetro onde pode-se observar nas coordenadas X e Y os valores de rotação (rpm) e torque (N.m), os quais são grandezas que exprimem o aspecto de fluidez e coesão do concreto, que comparativamente apresentam as diferenças e similaridades reológicas entre as dosagens. O torque é diretamente correlacionável com a tensão de cisalhamento e o rotação com a taxa de cisalhamento. A derivada do toque pela rotação apresenta a viscosidade aparente, como a inclinação da curva no ponto analisado.

Figura 4.8 - Valores obtidos dos ensaios de reometria realizados nos diferentes concretos para verificação do padrão reológico.



Analisando todos os gráficos obtidos do equipamento, constata-se que com exceção do concreto 100% de areia artificial, a viscosidade aparente são similares devido à inclinação das curvas e proximidade. As curvas apresentam um modelo de variação da viscosidade aparente com a variação da rotação pequena, modelo semelhante ao de Bingham.

O comportamento diferenciado do concreto 100% de areia artificial não se explica pelas análises visuais e realizadas pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, no qual obteve 120 mm. Esta discrepância provavelmente é resultante de uma ineficiência de empacotamento das partículas, não obtida no ajuste e apenas identificado através do ensaio com reômetro, no qual é possível analisar mais profundamente os aspectos reológicos. O concreto em questão se diferenciou dos demais, pois apresentou uma área de histerese maior (área interna as curvas

que mede a propriedade do fluido de manter a tensão de cisalhamento com a variação da taxa), indicando até uma possível separação da pasta com o agregado. Todos os outros apresentaram um menor torque, demonstrando que as misturas obtiveram um empacotamento na mesma proporção, facilitando a fluidez e resultando em concretos com menor probabilidade de segregação durante o ensaio. Estes concretos apresentaram padrões aproximados de reologia, variando o torque na faixa de 3 a 10 N.m (média de 6,5 N.m) para as diferentes rotações empregadas na mistura.

Todos os concretos foram moldados independentemente dos resultados obtidos na análise por reômetro, pois o estudo foi realizado como caracterização do concreto fresco e verificação, sem contribuição nos ajustes.

4.2.3 Resistência à compressão do concreto

Os ensaios para determinação da resistência à compressão obedeceram às prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo seus valores médios apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores médios de resistência à compressão

Concreto	f_{cj} (MPa) – idade controle			s (MPa) – desvio padrão		
	8 dias	28 dias	91 dias	8 dias	28 dias	91 dias
Ref	29,43	36,60	38,60	0,84	0,53	0,57
50%AM	24,50	29,90	30,30	1,01	1,24	0,75
100%AM	27,90	37,23	37,53	1,47	1,16	1,75
45%AG	26,37	29,33	34,77	1,37	2,20	0,83
100%AG	28,35	29,30	35,03	0,07	1,01	2,81
50%AM 45%AG	22,80	23,23	29,93	1,64	2,20	0,75
100%AM 100%AG	28,43	37,37	38,50	0,47	1,05	0,14
8%AD	22,87	30,57	28,10	1,21	1,02	2,07
8%AD 50%AM 45%AG	20,40	24,97	29,43	0,75	0,35	2,01
8%AD 100%AM 100%AG	17,37	25,90	30,70	2,41	1,05	0,89
8%AD 50%AM	24,97	31,93	36,67	0,57	0,70	1,07

Com a análise estatística pela ANOVA chegou aos resultados apresentados na Tabela 4.2 para um nível de significância (α) de 5% (nível de confiança de 95%), onde é analisado se as variáveis consideradas são influentes no sistema. Para isso existem dois parâmetros para análise, o “F calculado” (F_{cal}) e o p-valor (que é área obtida do gráfico de distribuição de Fisher). A hipótese nula que está sendo testada é de que os valores são todos iguais, e não há influência significativa das variáveis analisadas. Ela é confirmada quando o p-valor é maior que o nível de significância α (nesse caso, 5%). Quando ocorre o contrário, em que o p-valor

é inferior a α , a hipótese nula não se confirma, nesse caso considera-se que a variável analisada tem influência significativa no sistema. Os valores do parâmetro “p-valor” fornecem a intensidade de influência/efeito das variáveis, sendo mais influentes aquelas que resultam no menor p-valor.

Tabela 4.2 – Análise de variância realizada com os dados individuais de resistência à compressão

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	p	Resultado
Modelo	2756,02	32	86,12	46,79	0,000000	Significativo
Concreto	1299,08	10	129,91	70,59	0,000000	Significativo
Idade	1224,56	2	612,28	332,7	0,000000	Significativo
Concreto x Idade	236,3	20	11,81	6,42	0,000000	Significativo
Erro (Resíduo)	114,1	62	1,84			

$R^2_{\text{mod}} = 0,94$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Grau de Liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste significância dos efeitos;

p = Parâmetro p-valor que fornece a intensidade de influência/efeito referente a área obtida do gráfico de distribuição de Fisher.

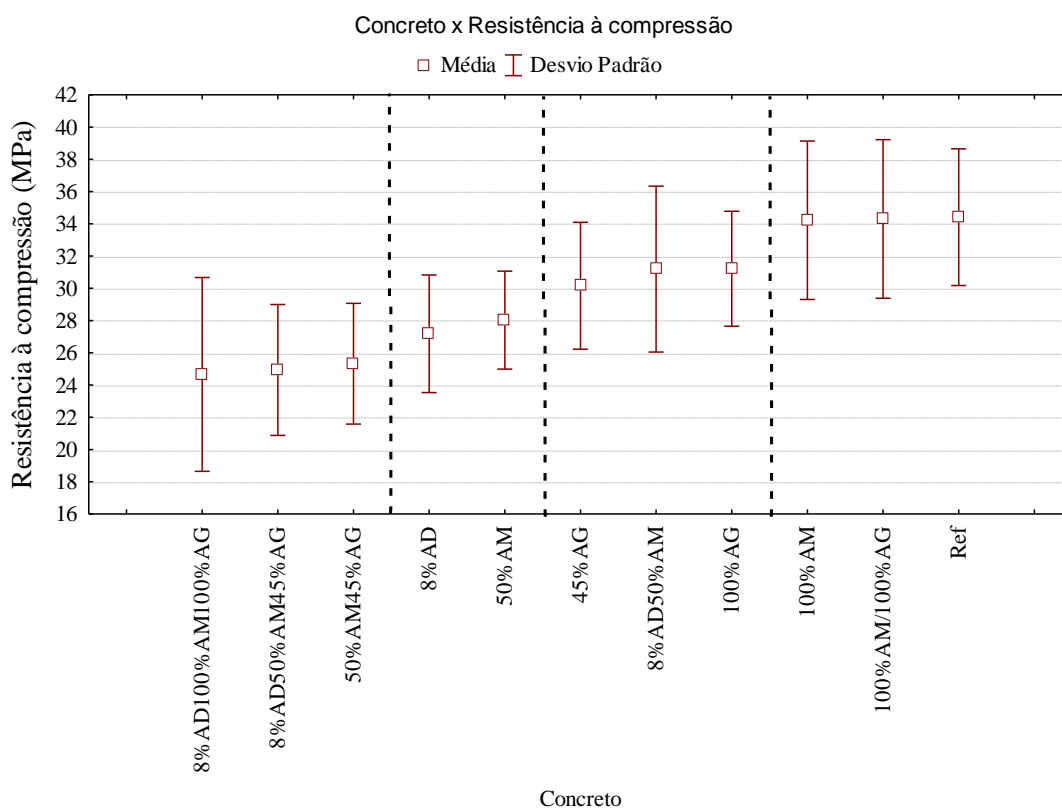
R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo $(1 - \text{SQ}_{\text{erro}}/\text{SQ}_{\text{total}})$

A análise mostrou que o modelo fatorial adotado é significativo e que o p-valor obtido é bem inferior a 0,05. O modelo possui um coeficiente de determinação de 0,94, significando que 94% da variação total dos dados podem ser explicados pelo modelo.

Os efeitos individuais da variável tipo de concreto e idade são estatisticamente significativos para intervalo de confiança de 95%. Sendo assim, cada variável isoladamente exerce influência sobre a variável dependente em questão, no caso a resistência à compressão. Quanto à interação concreto x idade, esta se mostrou, também, significativa, ressaltando que a influência que o tipo de concreto exerce sobre a resistência à compressão depende da idade e vice-versa, demonstrando certa sinergia entre esses dois fatores. As variações dos percentuais de resíduo nos agregados miúdo, graúdo e no cimento influenciaram na resistência à compressão.

Como as variáveis resultaram significativas, na Figura 4.9 são apresentados os gráficos relativos às comparações múltiplas de média dos concretos (em termos da resistência à compressão), realizadas pelo método de Duncan, com objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si e de separar aquelas que diferem.

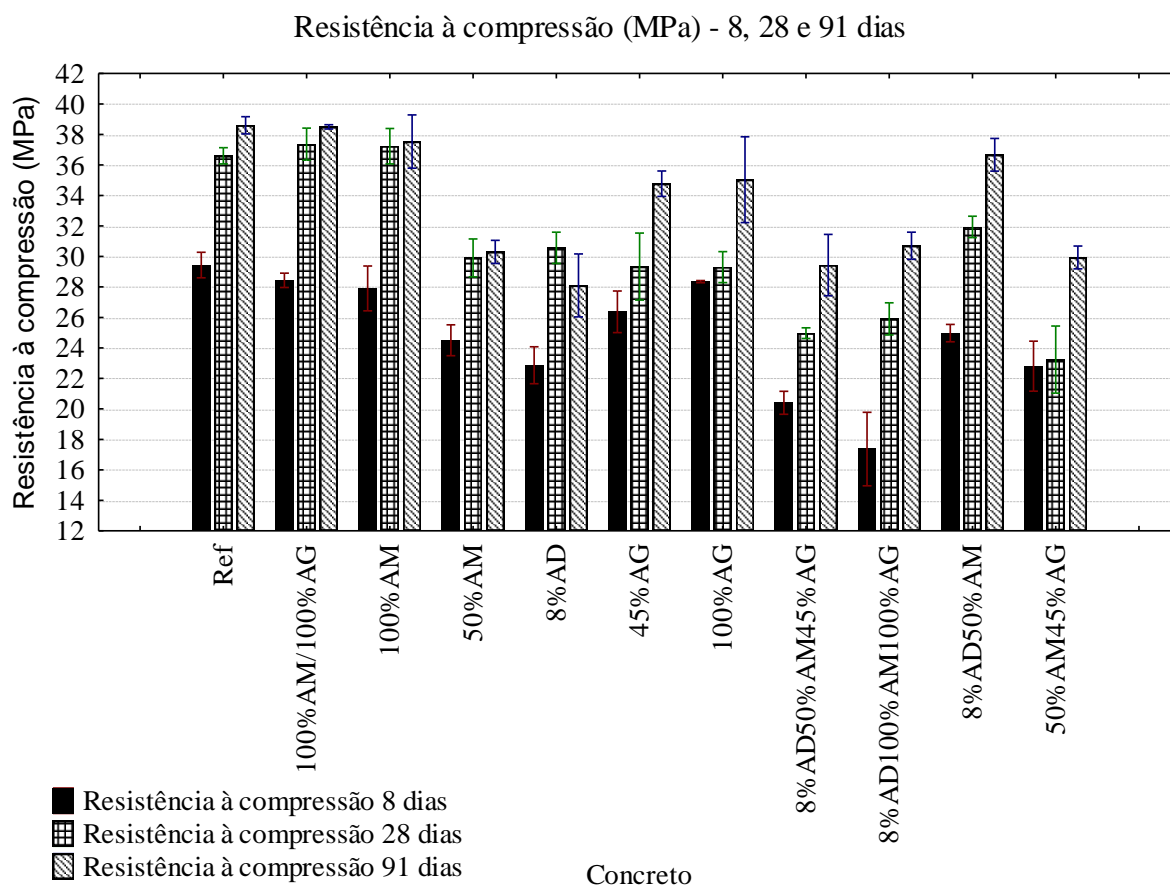
Figura 4.9 - Estimativa de média global dos valores de resistência à compressão e desvio padrão, ressaltando os agrupamentos pelo teste de Duncan



O agrupamento de médias realizado para os diferentes tipos de concreto determinou a existência de quatro grupos distintos, que são considerados estatisticamente diferentes com relação à resistência à compressão. Os concretos 100% AM, 100% AM100% AG e REF foram as misturas que obtiveram maiores valores de resistência à compressão, que estatisticamente são considerados iguais, contrariando a concepção inicial que as dosagens intermediárias, intituladas como otimizadas, poderiam produzir maiores resistências, por apresentarem maior eficiência no empacotamento da mistura obtida a partir do projeto piloto. A maior resistência obtida foi o concreto REF com 34,41 MPa, 35,9% superior a menor resistência obtida, que foi o concreto 50% AM45% AG atingindo 25,32 MPa. Esta diferença demonstra a capacidade de interferência do agregado nas propriedades do concreto endurecido, provavelmente reflexo das características intrínsecas da matéria-prima, processo de fabricação e de britagem do resíduo, no qual gera um material com características de textura, forma (arestas) e estrutura que interferem na reologia e na interação da matriz cimentícia com o agregado.

Na Figura 4.10, os valores médios de resistência à compressão estão apresentados para cada diferente dosagem, agrupados conforme as idades de ruptura.

Figura 4.10 - Médias das resistências à compressão dos concretos com o desvio padrão para cada idade



A evolução da resistência à compressão pela idade não ocorre da mesma forma para todos os concretos, sendo que para cada um deles existe um quantil diferente para esse aumento.

Outra constatação possível de ser feita é que os concretos não obedeceram rigorosamente à lei de Abrams, pois obtiveram resultados diferentes de resistência à compressão para o mesmo valor de relação água/cimento, fixado em 0,55. Considera-se que isto ocorre porque a lei é aplicada para concretos realizados para o mesmo tipo de agregado, desconsiderando seu efeito, caso este não ocorrido para a pesquisa em questão por se tratar de substituições por agregado de resíduo com propriedades diferentes e em quantidades volumétricas distintas. Provavelmente, a incorporação do agregado interfere negativamente na formação da zona de transição, devido à forma irregular e com arestas da partícula e também a interferência do esmalte como ponte de aderência. Junta-se a isto a questão de valores representativos de ar para alguns concretos e também uma resposta tímida de pozolanicidade do pó quando substituiu o cimento.

Para determinar se um concreto obteve um resultado superior em relação a outro, é fundamental que se analise a resistência à compressão vinculada ao consumo de cimento. Na Tabela 4.3 estão às eficiências obtidas para 28 dias e 91 dias para os concretos moldados e, logo em seguida, o percentual alcançado com relação à referência e o percentual de consumo equivalente em comparação à referência.

Tabela 4.3 – Avaliação da eficiência dos concretos em função do consumo de cimento

Tipo concreto	Eficiência 28 dias (MPa/kg)	Eficiência 91 dias (MPa/kg)	Concreto /REF 28 dias	Concreto/REF 91 dias	Consumo equivalente	Consumo Concreto/ REF
Ref	0,117	0,123	100,00%	100,00%	314	100,00%
100%AM 100%AG	0,097	0,097	83,05%	78,53%	386	122,99%
50%AM	0,087	0,089	74,93%	72,00%	342	108,97%
100%AM	0,107	0,108	91,80%	87,74%	348	110,88%
45%AG	0,090	0,107	77,22%	86,79%	326	103,87%
100%AG	0,081	0,096	69,20%	78,45%	363	115,66%
8%AD	0,096	0,088	82,32%	71,76%	318	101,32%
8%AD 50%AM 45%AG	0,068	0,080	58,43%	65,31%	366	116,62%
8%AD 100%AM 100%AG	0,071	0,084	60,55%	68,05%	367	116,94%
50%AM 45%AG	0,064	0,083	55,04%	67,24%	362	115,34%

Analisando a Tabela 4.3, percebe-se que existem provavelmente diferentes efeitos que se somam ou interagem para obtenção do resultado da propriedade. Uma menor presença de resíduo no concreto, um melhor empacotamento obtido na mistura, menor inferência da zona de transição devido aos diferentes volumes e tipos de agregados, são condições que de forma simultânea resultam nos valores de resistência à compressão.

Inicialmente tem-se o concreto de referência com o melhor resultado, apresentando uma eficiência de 0,117 MPa/kg aos 28 dias e 0,123 MPa/kg aos 91 dias. Essa discrepância resulta de duas características principais do resíduo: forma do agregado e região esmaltada. A forma interfere em dois aspectos, dificultando uma maior compacidade da estrutura granular e ocasionando um efeito parede mais pronunciado, com uma região mais afastada entre os grãos de cimento e o agregado, proporcionando uma zona de transição com maior fragilidade, aspecto identificado nas micrografias da Figura 4.6 b). A região esmaltada interfere na diminuição de pontos de ancoragem dos produtos de hidratação do cimento na superfície do resíduo, somando ao efeito da morfologia do agregado. Ambos os aspectos são potencializados em função do diâmetro máximo característico adotado para o concreto.

Na sequência estão os concretos com volume de agregado bem próximo da referência que são 45%AG e 8%AD. São concretos que quando analisados apenas pelo valor obtido no ensaio de ruptura (Figura 4.9), aparentemente não trazem interesse, mas quando avaliados junto à informação do consumo, passam a se destacar. Para estes concretos o baixo percentual de substituição provavelmente está influenciando de forma mais contumaz.

A avaliação por eficiência do concreto 100%AM confirma a análise estatística de uma dosagem com bom desempenho, apesar de possuir um volume total de agregado miúdo substituído pelo resíduo. Devido à substituição ter ocorrido no agregado miúdo, a explicação para tal comportamento seria uma interferência menor do resíduo no agregado miúdo, onde o efeito parede ocorre de forma mais amena e interferindo menos na formação das zonas de transição.

E para o concreto 100%AM/100%AG, o bom desempenho alcançado advém provavelmente de uma quantidade menor de agregados totais, que conseqüentemente produz uma interferência menor das zonas de transições sobre as propriedades do concreto, sobrepondo a piora na qualidade da zona de transição provocada pela introdução do resíduo, característica identificada também nas imagens geradas pelo MEV, apresentadas na Figura 4.6.

4.2.4 Módulo de Elasticidade

Os resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade estático foram obtidos empregando-se corpos de prova cilíndricos ensaiados à compressão axial, obedecendo às prescrições da ABNT NBR 8522 (ABNT, 2008). A Tabela 4.4 apresenta os valores médios do módulo de elasticidade estático com seu devido desvio padrão.

Tabela 4.4 – Valores médios de módulo de elasticidade

Concreto	Módulo de Elasticidade (GPa)			Desvio Padrão (GPa)		
	8 dias	28 dias	91 dias	8 dias	28 dias	91 dias
Ref	33,57	38,27	38,90	1,30	2,25	1,75
50%AM	28,83	28,67	35,47	2,41	2,37	1,25
100%AM	30,73	33,13	35,13	1,15	0,95	0,90
45%AG	33,63	38,27	37,33	3,04	1,80	4,60
100%AG	32,63	37,23	38,87	0,91	0,87	0,60
50%AM 45%AG	28,60	30,90	32,83	1,20	0,75	0,32
100%AM 100%AG	29,07	31,73	33,33	0,70	2,47	1,47
8%AD	31,57	36,80	37,37	2,10	3,83	1,27
8%AD 50%AM 45%AG	31,67	31,73	32,23	4,86	0,55	1,85
8%AD 100%AM 100%AG	26,77	30,63	32,37	0,85	0,67	1,60
8%AD 50%AM	30,57	32,70	33,13	0,46	0,30	1,07

A análise realizada para os resultados de módulo de elasticidade seguiram os mesmos passos realizados na análise da resistência à compressão, sendo os resultados, também, submetidos a uma análise estatística de variância, conforme equação 3.1. A Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA), onde se observa que os efeitos de todas as variáveis individuais foram considerados estatisticamente significativos (para um nível de confiança de 95%), com exceção da interação.

Tabela 4.5 - Análise de variância realizada com os dados individuais de módulo de elasticidade

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	p	Resultado
Modelo	1033,85	32	32,30	8,49	0,000000	Significativo
Concreto	587,4	10	58,7	15,44	0,000000	Significativo
Idade	342,8	2	171,4	45,07	0,000000	Significativo
Concreto x Idade	103,6	20	5,2	1,36	0,174463	Não Significativo
Erro (Resíduo)	251,0	66	3,8			

$R^2_{\text{mod}} = 0,709$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados; GL = Grau de Liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste significância dos efeitos;

P = Parâmetro p-valor que fornece a intensidade de influência/efeito referente a área obtida do gráfico de distribuição de Fisher.

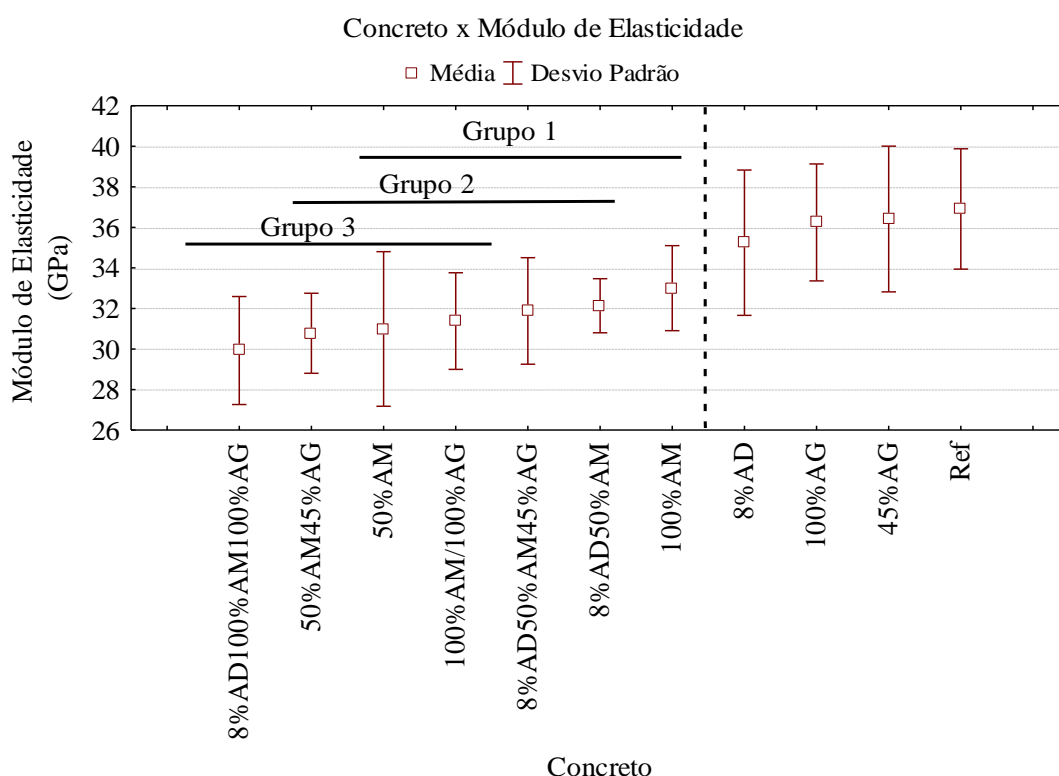
R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo $(1 - \text{SQ}_{\text{erro}} / \text{SQ}_{\text{total}})$

O modelo se apresentou significativo, sendo que das variáveis analisadas, apenas a interação entre concreto e idade não foi significativa, inferindo-se, assim, que a influência que o tipo de concreto exerce sobre o módulo de elasticidade independe da idade e vice-versa, o que demonstra uma falta de sinergia entre os fatores. Quanto às variações dos percentuais de

resíduo nos agregados miúdo, graúdo, cimento e a variável idade, percebeu-se que estas influenciaram no módulo de elasticidade.

Como as variáveis se mostraram significativas, na Figura 4.11 é ilustrado o gráfico relativo às comparações múltiplas de média, realizadas pelo método de Duncan, com objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si (separando aquelas que diferem).

Figura 4.11 - Média global dos valores de módulo de elasticidade, com desvio padrão, para cada tipo de concreto, mostrando os resultados de agrupamento pelo teste de Duncan



O módulo de elasticidade foi agrupado em dois grandes grupos diferenciados, um grupo composto pelos concretos REF, 45%AG, 100%AG e 8%AD, e outro no qual houve três grupos sobrepostos, no qual existem alguns concretos que participam de diferentes grupos simultaneamente por possuírem comportamentos bastantes semelhantes para diferentes conjuntos de concretos. O concreto com menor valor de módulo de elasticidade foi inferior em 23% ao referência (de maior módulo).

Em comparação a outros estudos realizados com o resíduo, Santhamarai e Devadas Manoharan (2005) obtiveram valores 10% inferiores para o módulo de elasticidade em comparação ao referência. Campos (2009) também observou uma diminuição na capacidade

de resistir às deformações para todos os concretos, sendo que o concreto 100%AG obteve 11% de redução de módulo de elasticidade, explicados pelo pesquisador como resultante da forma lamelar dos agregados obtidas ao ser britado e a área vitrificada prejudicando a aderência.

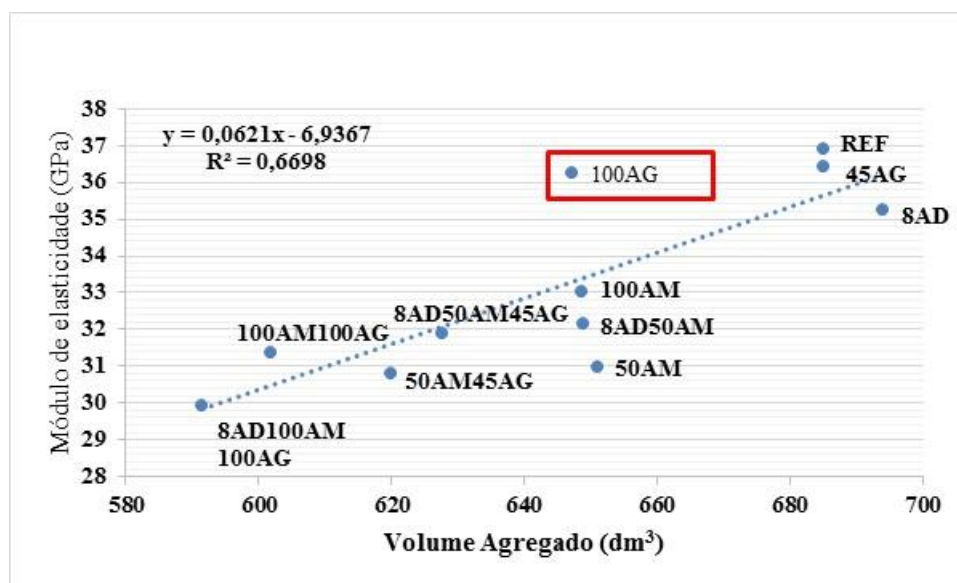
Estas discrepâncias ocorridas entre os pesquisadores e a pesquisa em questão são provavelmente resultantes da variação volumétrica entre pasta/agregado, ar incorporado e abatimento. Pois todos os trabalhos foram realizados com concretos secos, com a provável finalidade para utilização em pré-moldados, com algumas poucas exceções com abatimento de 80 mm, reologia bastante diferente ao da pesquisa.

Os concretos analisados que obtiveram melhores resultados tenderam para aqueles com maior quantidade de agregados, e com menor percentual de agregados convencionais substituídos por resíduo. Os concretos REF, 8%AD, 45%AG e 100%AG responderam com poucas deformações devido à capacidade de restrição que o volume de agregado em proporções maiores conseguiram proporcionar.

Fazendo-se uma comparação entre a variação do volume de agregado pelo módulo de elasticidade, apresentada na Figura 4.12, é visível que os volumes de agregados foram diminuindo com o aumento de substituição do agregado convencional por resíduo. Com isso, os concretos no qual houve substituições tanto no agregado miúdo quanto no graúdo, necessitaram de uma quantidade maior de pasta para proporcionar o aspecto de coesão e lubrificação do agregado necessário para o bombeamento do concreto. A decisão tomada em função do concreto fresco impactou no concreto endurecido em todas as propriedades analisadas até o momento.

A Figura 4.12 demonstra o aspecto de crescimento do módulo de elasticidade com o aumento do volume de agregados.

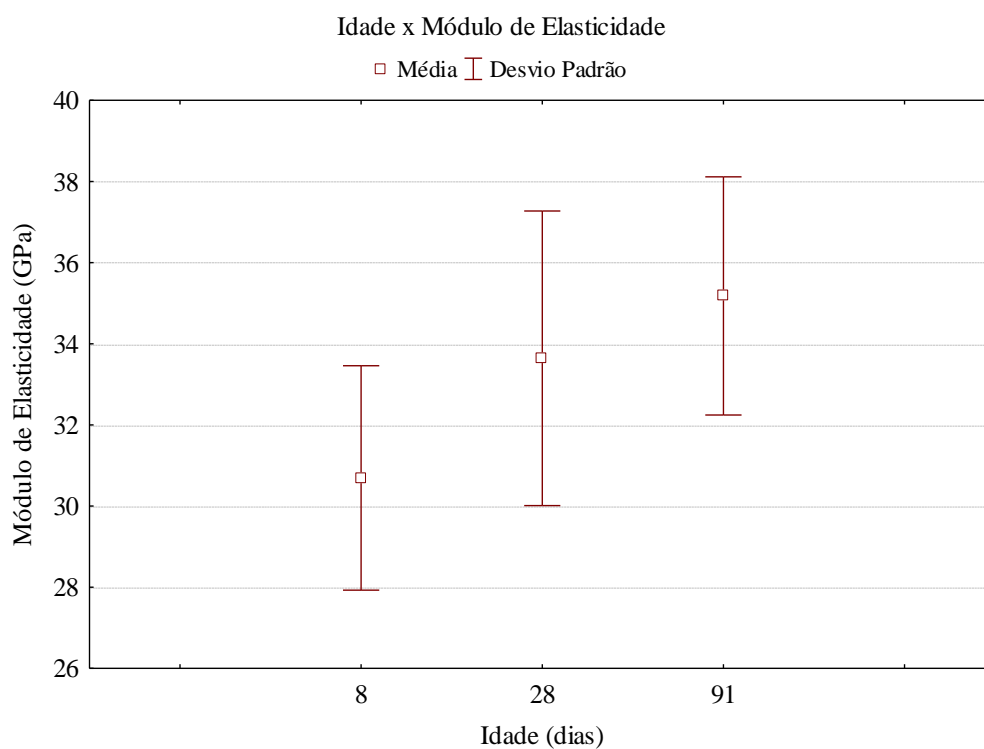
Figura 4.12 - Regressão linear do comportamento dos concretos quanto ao volume de agregado *versus* o módulo de elasticidade



Nos pontos do gráfico da Figura 4.12, chama atenção o concreto que mais distanciou da reta de regressão, que foi o concreto 100%AG (destacado com um quadro em vermelho). Este concreto apesar de possuir um volume intermediário de agregado total obteve resultado bastante superior, provavelmente devido a dureza que as porcelanas possuem. Contudo, na curva de correlação ele demonstra ser um ponto espúrio. Se retirado, o valor de R^2 do ajuste realizado se tornaria 0,784.

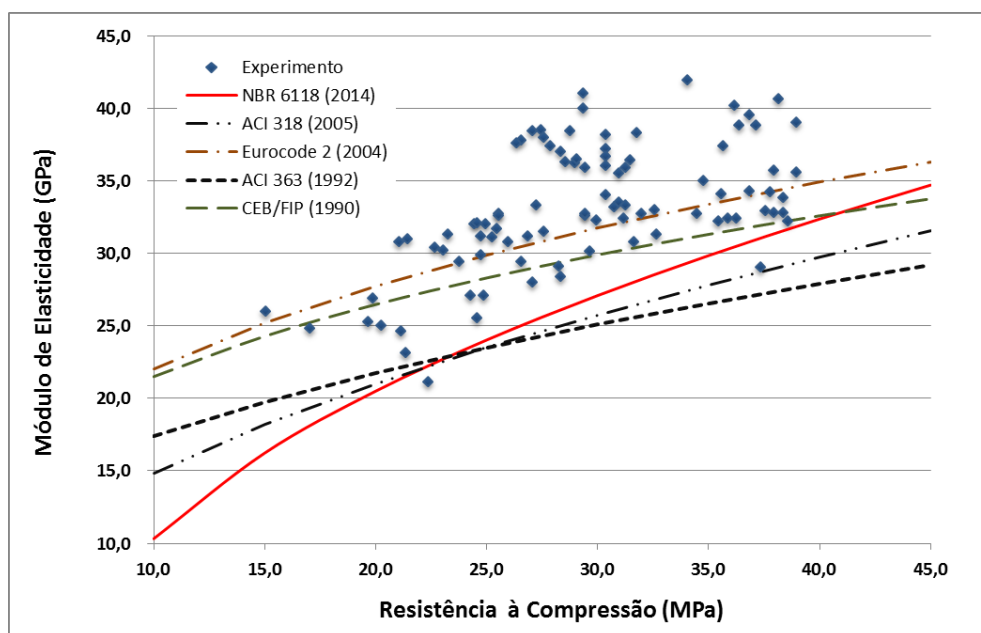
Comparando-se os valores do módulo de elasticidade com a idade, o gráfico ilustrado pela Figura 4.13 apresenta uma evolução do módulo com o avanço das idades, sendo o maior gradiente de crescimento do módulo de elasticidade entre as idades de 8 e 28 dias, com incremento de 10%, e de 5% entre as idades de 28 dias e 91 dias.

Figura 4.13 - Estimativa de média global dos valores de módulo de elasticidade, com seu desvio padrão, por idade



Analisando os valores de módulo de elasticidade obtidos no experimento, na Figura 4.14, frente aos valores resultantes de formulações apresentadas em diversas normas internacionais, como também a brasileira, verifica-se que os resultados obtidos com a incorporação do resíduo ficaram bem acima da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), sendo as melhores aproximações feitas com o Eurocode 2 e CEB/FIP.

Figura 4.14 - Valores estimados por diversas normas e os respectivos pontos de módulo de elasticidade obtidos pelo experimento



4.2.5 Absorção de Água

Os valores obtidos pelos ensaios para determinação do percentual de absorção de água, realizados em corpos de prova cilíndricos conforme prescrições da ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005), estão apresentados na Tabela 4.6, na qual estão contidos os valores médios de percentual de absorção de água com seu devido desvio padrão.

Tabela 4.6 – Valores médios de percentual de absorção de água

Concreto	Absorção (%)			Desvio Padrão (GPa)		
	8 dias	28 dias	91 dias	8 dias	28 dias	91 dias
Ref	5,96	6,29	6,13	0,11	0,11	0,32
50%AM	8,55	7,56	7,22	0,55	0,23	0,26
100%AM	8,66	6,92	6,51	0,57	0,10	0,47
45%AG	6,07	7,05	6,90	0,02	0,20	0,07
100%AG	7,64	7,24	7,24	0,12	0,18	0,19
50%AM 45%AG	9,07	8,90	8,35	0,14	0,35	0,10
100%AM 100%AG	8,83	8,71	8,58	0,26	0,24	0,24
8%AD	6,62	6,48	6,48	0,25	0,33	0,23
8%AD 50%AM 45%AG	8,66	8,32	8,46	0,04	0,05	0,14
8%AD 100%AM 100%AG	10,47	9,53	10,80	0,32	0,21	0,51
8%AD 50%AM	6,90	6,96	7,79	0,20	0,05	0,31

A Tabela 4.7 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA), onde se observa que os efeitos de todas as variáveis, tanto as individuais quanto as interações, resultaram estatisticamente significativos (para um nível de confiança de 95%).

Tabela 4.7 - Análise de variância realizada com os dados individuais de absorção de água, para os fatores considerados no modelo estatístico

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	p	Resultado
Modelo	150,1294	32	4,691545	64,58083	0,00	Significativo
Concreto	130,993	10	13,099	180,32	0,000000	Significativo
Idade	1,896	2	0,948	13,05	0,000017	Significativo
Concreto x Idade	16,094	20	0,805	11,08	0,000000	Significativo
Erro (Resíduo)	4,722	65	0,073			

$R^2_{\text{mod}} = 0,954$

Onde:

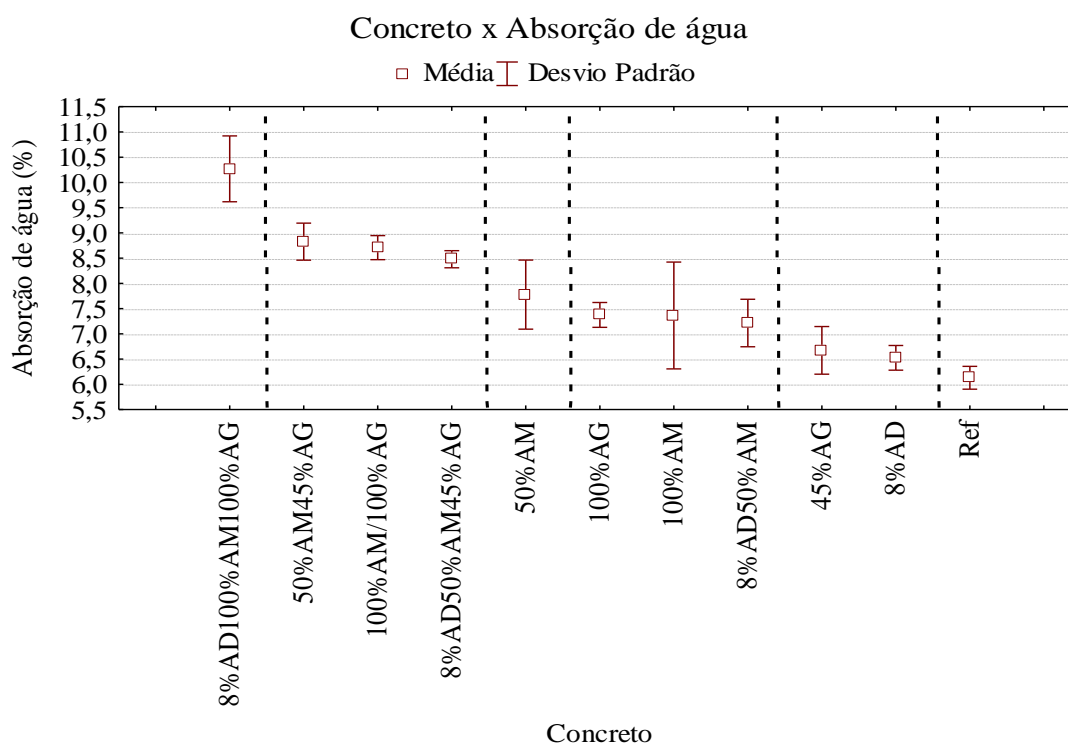
SQ = Soma dos quadrados; GL = Grau de Liberdade; MQ = Média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fisher para o teste significância dos efeitos;

R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo ($1 - \text{SQ}_{\text{erro}} / \text{SQ}_{\text{total}}$)

Na Figura 4.15 é ilustrado o gráfico relativo às comparações múltiplas de média, realizadas pelo método de Duncan.

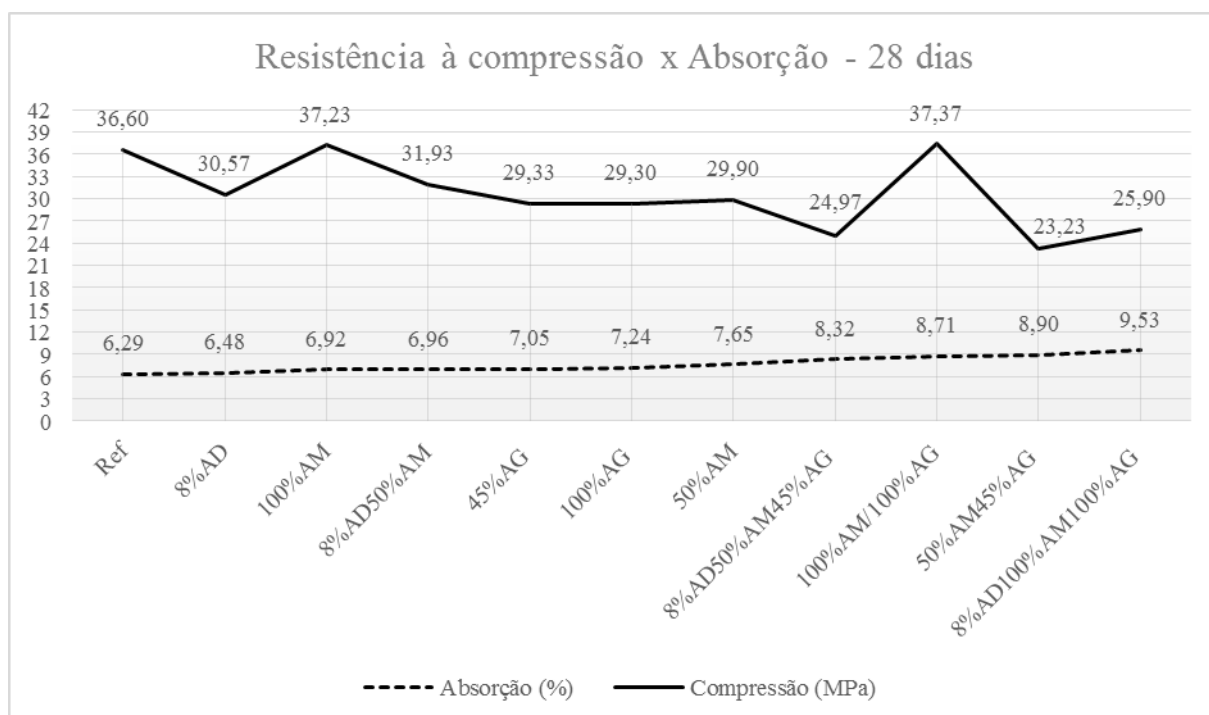
Figura 4.15 - Média global dos valores de absorção, com seu desvio padrão, para cada tipo de concreto. As linhas tracejadas separam estatisticamente grupos diferentes, pelo teste de Duncan



Os concretos que obtiveram melhores valores foram o Referência seguido do 8%AD e 45%AG. A Figura 4.15 demonstra uma piora gradativa com o aumento do percentual de resíduo em substituição ao agregado convencional. Salienta-se ainda que todos os concretos obtiveram resultados acima de 5,0% para absorção, sendo considerados concretos de alta absorção pelo Comité Euro-International du Béton número 192 apud Cascudo (1997).

A Figura 4.16 apresenta um comparativo entre resistência à compressão e os resultados de absorção de água aos 28 dias de ensaio, no qual não foi possível realizar um modelo de regressão representativo que explicasse as propriedades. É possível verificar uma tendência para quase todos os concretos que a diminuição da resistência à compressão reflete na piora da absorção, com exceção do concreto 8%AD que respondeu melhor à absorção do que a compressão e o concreto 100%AM100%AG que obteve valores significativos de absorção para resistências a compressão significativas.

Figura 4.16 - Gráfico comparativo entre resistência à compressão e absorção de água

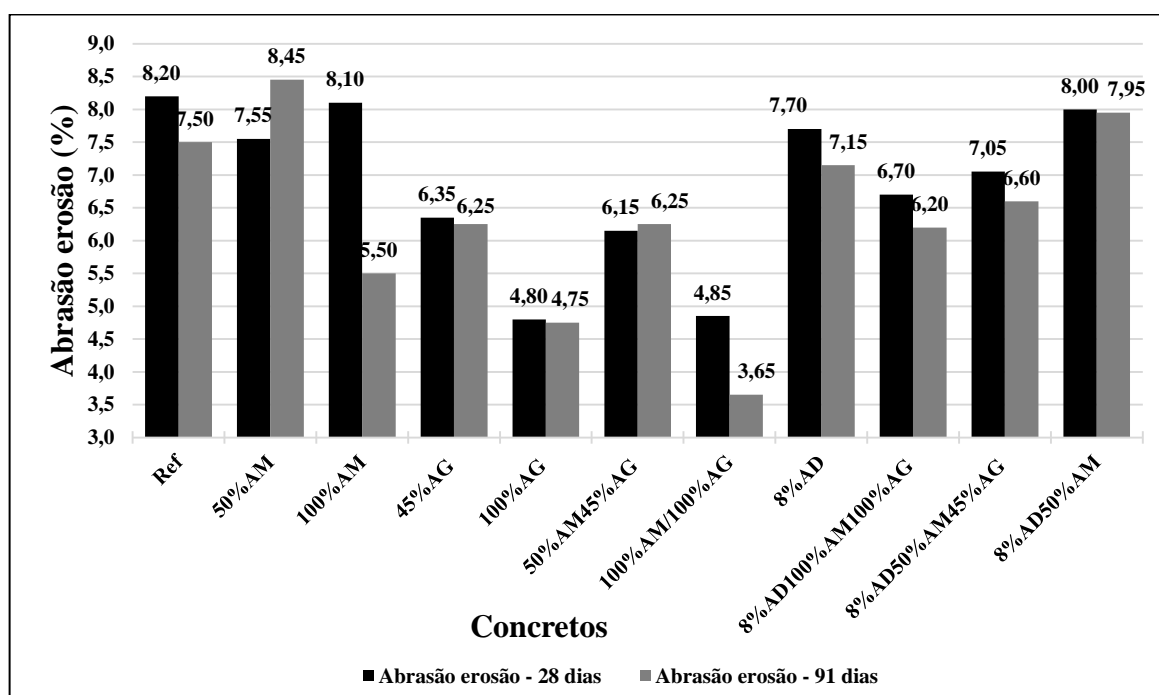


De forma geral, essa piora no percentual de absorção com incremento do resíduo, está também relacionado as questões descritas na resistência à compressão quanto a interação das propriedades do agregado com a pasta de cimento. O mesmo ocorreu com Senthamarai et. al. (2011) que estudando a absorção do concreto para a avaliação da penetração de cloretos, identificou para os concretos de relação água cimento variando de 0,35 a 0,60, piora da propriedade em torno de 17% para os concretos mais ricos e de 13% para os mais pobres.

4.2.6 Abrasão-erosão

A Figura 4.17 trata das médias dos valores obtidos por 2 corpos de prova para cada tipo de concreto. Ela mostra que a substituição do cimento por 8% de pó melhorou os patamares de resistência a abrasão-erosão. Deve-se ressaltar que todos os concretos com a incorporação do resíduo, tanto no agregado miúdo quanto no graúdo, obtiveram melhoria na resistência ao desgaste superficial.

Figura 4.17 - Médias dos resultados de abrasão-erosão obtidos para os concretos ensaiados por idade

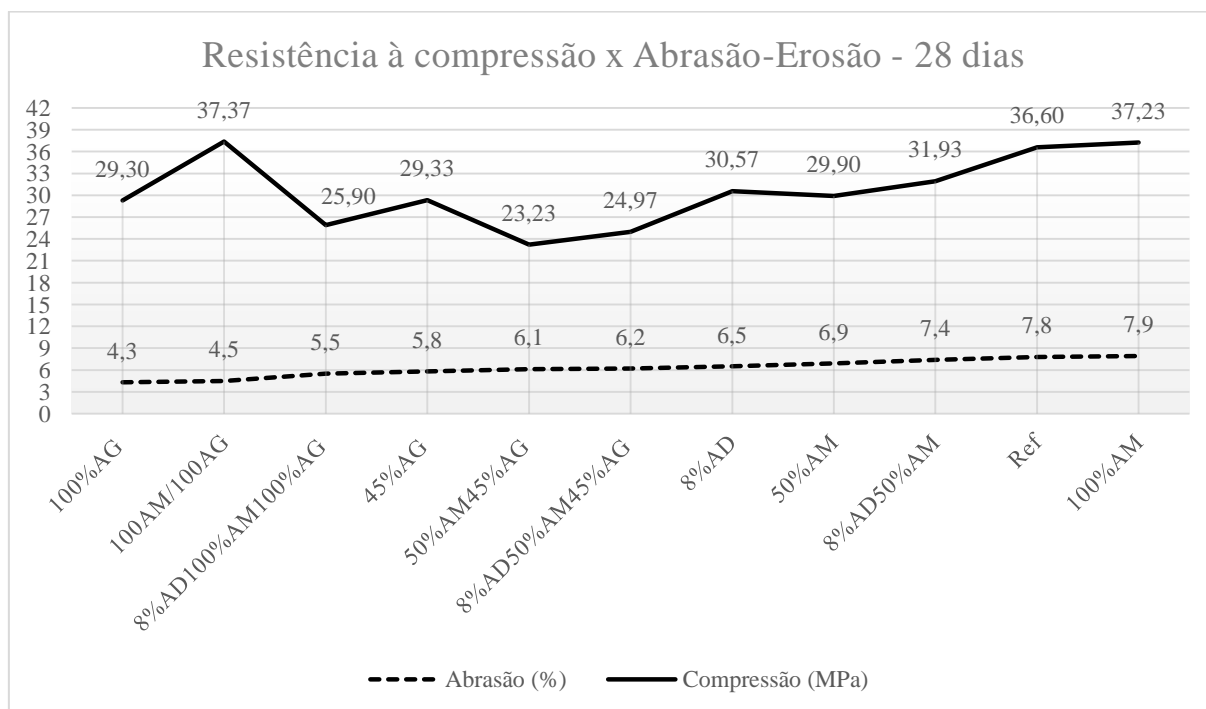


Os concretos que apresentaram melhores resultados foram os que continham o resíduo substituído em sua fração mais graúda (sem a incorporação do pó), principalmente quando se substituiu a fração do agregado graúdo. O concreto 100%AM100%AG foi o que obteve a menor perda de massa, com 3,65% aos 91 dias. Esse comportamento pode estar ligado à resistência mecânica e dureza da porcelana, a qual forma uma barreira para o avanço do desgaste a abrasão-erosão. Importante relatar que fatores que podem interferir no fenômeno de abrasão do concreto estão relacionados ao volume, à resistência, dimensão e tipo do agregado (Aitcin, 2000) utilizado e, por isso, sua qualidade deve ser levada em consideração.

Resultados de laboratório têm demonstrado que a resistência à abrasão é proporcional a resistência à compressão (ACI 201, 2001), para o mesmo tipo de concreto. A Figura 4.18 apresenta dados em que é possível verificar que não houve uma tendência da resistência à

abrasão-erosão acompanhar a resistência à compressão, demonstrando que são concretos diferentes em suas composições, no qual a quantidade de resíduo incorporado possui preponderância ao sistema.

Figura 4.18 - Gráfico comparativo entre resistência à compressão e abrasão-erosão.



Para atender aos requisitos das especificações de superfícies hidráulicas com fluxo de água em alta velocidade de construções de usinas hidrelétricas realizadas pela empresa Eletrobras Furnas, o valor adotado como limite para o ensaio de abrasão-erosão é 4%, sendo que o concreto de 100%AM/100%AG foi o único que atendeu a esse critério. Todavia, esse ensaio é qualitativo, de modo que o parâmetro de 4% não é condição única de concordância de emprego da dosagem.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo uma análise e discussão da incorporação do resíduo das porcelanas dos isoladores no concreto, pautado em resultados experimentais obtidos de ensaios para mensuração das propriedades do concreto fresco e endurecido. Para isto, foi necessário uma caracterização do resíduo e posterior moldagem de concretos com diferentes percentuais de substituição no agregado miúdo, graúdo e como substituição ao cimento.

Os concretos no qual foram realizados utilizando pó substituindo o cimento não se apresentaram viáveis devido aos custos para se realizar a moagem em relação aos resultados obtidos para todas as propriedades, não obtendo para as propriedades do concreto a atividade pozolânica observada nos ensaios de qualificação do pó.

O resíduo nesta pesquisa demonstra que é viável para algumas combinações a utilização da porcelana como agregado miúdo e graúdo em concretos com fins estruturais, sem apresentar grandes perdas nas propriedades do concreto endurecido em relação ao concreto de referência (em algumas situações particulares, constatou-se, inclusive, resultado da mesma ordem de grandeza do concreto de referência). Os aspectos reológicos para um concreto bombeável foram ajustados para todas as dosagens, tanto para os concretos com resíduos de porcelanas quanto para os de agregado convencional, existindo uma similaridade nos aspectos e propriedades averiguadas, mas ao preço de um maior consumo de cimento e de areia para as dosagens com resíduos.

Dentre todos os concretos analisados, não houve um, especificamente, que atingisse os melhores resultados para todas as propriedades. Pode-se elencar uma série de concretos no qual existe um potencial de utilização, tendo em vista a gama de valores próxima do referência e dentro de valores obtidos em concretos com agregado convencional. Eles são elencados na Tabela 5.1 com seus respectivos valores.

Caso o foco seja uma maior destinação de resíduo, o concreto que realizaria este papel seria o 100%AM100%AG, mas no ensaio de absorção os valores não foram tão favoráveis quanto aos obtidos para os outros concretos.

Os ensaios de absorção de água e abrasão-erosão, que são ensaios voltados para verificar o comportamento do concreto com foco na durabilidade, demonstraram a necessidade de se

utilizar concretos com relação água/cimento mais baixa para garantir uma vida útil aceitável frente a ambientes mais agressivos.

Tabela 5.1 – Cadeia de geração do resíduo proveniente das porcelanas dos isoladores elétricos.

Concretos - Valores obtidos											
100% AM			45% AG			100% AG			100% AM 100% AG		
Resistência à Compressão											
8	28	91	8	28	91	8	28	91	8	28	91
27,90	37,23	37,53	26,37	29,33	34,77	28,35	29,30	35,03	28,43	37,37	38,50
Módulo de Elasticidade											
8	28	91	8	28	91	8	28	91	8	28	91
30,73	33,13	35,13	33,63	38,27	37,33	32,63	37,23	38,87	29,07	31,73	33,33
Absorção de água											
8	28	91	8	28	91	8	28	91	8	28	91
8,66	6,92	6,51	6,07	7,05	6,90	7,64	7,24	7,24	8,83	8,71	8,58
Abrasão erosão											
-	7,9	6,3	-	5,8	5,6	-	4,3	4,1	-	4,5	3,7

Discussões mais aprofundadas sobre cada temática estão categorizados nas conclusões listadas a seguir.

5.1. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos conduziram para três linhas de conclusões distintas: caracterização físico-química dos resíduos, propriedades do concreto fresco e propriedades do concreto endurecido.

5.1.1 Caracterização físico-química dos resíduos

As propriedades físicas e de durabilidade do resíduo como agregado miúdo e graúdo foram bem similares aos obtidos para o agregado convencional, contudo a massa específica do resíduo é menor. Os ensaios de absorção e índice de forma foram bastante similares. Os ensaios de abrasão los angeles, ciclagem etileno glicol e sanidade demonstraram que o resíduo apresenta características de muita estabilidade, não ultrapassando 50% de desgaste superficial da NBR 7211 (ABNT, 2009), sendo que os valores determinados foram para abrasão los angeles 21%, etileno glicol 0,02% e sanidade de 0,04%.

O material pulverulento para agregado miúdo levando em consideração o limite da NBR 7211 (ABNT, 2009) é de no máximo 5% para concretos protegidos ao desgaste superficial, que para o resíduo foi levemente ultrapassado, podendo ser atendido após ajustes na produção, mas pela NBR 15116 (ABNT, 2014) para agregados reciclados o valor máximo de 20% foi

atendido. Quanto ao limite para agregado graúdo, 1% e 10% para as respectivas normas NBR 7211 (ABNT, 2009) e NBR 15116 (ABNT, 2014), o percentual de 0,39% ficou em patamares aceitáveis.

Caso o concreto tenha aplicação para condições sem proteção ao desgaste superficial, estudos específicos deverão ser realizados por causa do limite de 3% da NBR 7211 (ABNT, 2009) ter sido ultrapassado; em contrapartida, para outros concretos, onde o material pulverulento possui um aspecto positivo para fechamento da porosidade e melhoria na trabalhabilidade como no concreto compactado com rolo, o agregado miúdo com essas características são recomendáveis. A massa específica determinada para o resíduo encontra-se na faixa destinada aos agregados mais leves, com valor de 2,37 g/cm³ para o agregado miúdo e 2,47 g/cm³, sendo que uma avaliação se torna necessária para os concretos utilizados em estruturas de gravidade, onde a massa específica do concreto tem grande relevância na estabilidade estrutural.

Os limites para agregados reciclados para utilização em concreto não estrutural da NBR 15116 (ABNT, 2004) foram atendidas para todos os parâmetros, como limite máximo de absorção de 12% para agregado miúdo e 17% para graúdo, percentuais máximo de 1% de sulfatos e 1% de cloretos. Na classificação da norma, o agregado de porcelana é caracterizado como ARM (agregado de resíduo misto), por possuir menos de 90% em material a base cimentícia ou rocha. Mas esta classificação não representa bem o material, pois o ARM caracteriza-se por ser uma material bastante heterogêneo, o que não é observado nas porcelanas, necessitando com isso uma nova tipologia.

A caracterização química do material apresentou ser promissora devido ao alto percentual de silício, mas atenção especial deverá ser dada ao percentual representativo de álcalis totais que poderá desencadear reação álcali-agregado.

As micrografias obtidas do microscópio eletrônico de varredura do agregado graúdo determinou três superfícies distintas, onde na parte branca e interna da porcelana existe uma área com poros irregulares e de distribuição regular, com potencial de ancoragem da pasta de cimento no concreto. Uma região intermediária entre a parte branca e o esmalte, com menor quantidade de poros, de configuração mais arredondada. E por último o esmalte que é uma parte bastante lisa que provavelmente prejudicará a criação de uma zona de transição consolidada.

Quando se avalia qualitativamente o resíduo em finura de pó para verificação da potencialidade para o desenvolvimento da atividade pozolânica, determinado nos ensaios de atividade pozolânica com a cal (ABNT NBR 5751, 2015), o resultado ultrapassa os 6 MPa preconizado pela norma. Essa potencialidade também é identificada no crescimento de resistência à compressão da argamassa obedecendo os critérios da NBR 5752 (ABNT, 2014) entre as idades de 28 para 91 dias. Para corroborar com essa potencialidade, o ensaio de Châpelle modificado obteve como resultado 502,96 mg de Ca(OH)_2 / grama de material, ultrapassando o mínimo de 436 mg Ca(OH)_2 / grama de material. Este comportamento observado para o pó está vinculado a superfície específica obtida na moagem, para um blaine de 6230 g/cm^2 , dimensão média determinada por granulômetro a laser de $13,56 \mu\text{m}$ e área específica BET de $1,63 \text{ m}^2/\text{g}$. Provavelmente para finuras maiores, próximas as observadas para as superpozolanas os resultados seriam maximizados.

Ensaio de difração de raios X determinaram um material bastante cristalino com uma pequena banda amorfa. O processo de moagem não interferiu na microestrutura do material, sendo os minerais identificados como quartzo, mulita, cristobalita, coríndon e calcita.

O pó atende todos os requisitos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014), com $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}$ $\geq 50\%$, perda ao fogo $\leq 6\%$ e álcalis disponíveis $\leq 1,5\%$, para material pozolânico classe E.

Dando continuidade à caracterização do resíduo, são necessários testes quanto ao potencial de reação dos minerais presentes na composição do resíduo em desencadear reações patológicas dentro da matriz cimentícia, como a reação álcalis-agregado. Para isso a areia artificial do resíduo foi submetido a NBR 15577 (ABNT, 2008), e apresentou ser expansivo na presença de cimento com alto teor de álcalis. Com intuito de mitigar as expansões foi utilizado o cimento CP IV 32, que conseguiu mitigar a reação. Mas foi identificada em coletas realizadas em locais diferentes uma variabilidade nos resultados dos ensaios para o mesmo material, sendo com isso necessário um aprofundamento dos estudos para verificação se existe uma interferência proveniente da variabilidade da origem do resíduo. O pó de resíduo quando incorporado como adição mineral com a finalidade de mitigação das próprias expansões da reação álcalis-agregado, comportou como elemento para melhoria do sistema em função do aumento da finura, mas não foi suficiente para mitigar em proporções que as expansões ficassem abaixo do preconizado pela norma NBR 15577 (ABNT, 2008). Ensaio em concretos com inspeções de longa duração se faz interessante para consolidar a segurança técnica esperada para utilização de um material novo.

E finalizando, constata-se que as normas para agregado reciclado devem levar em consideração como forma de controle do agregado para utilização em concreto, principalmente caso seja estrutural, o ensaio para testar a potencialidade de desencadear a reação álcalis-agregado, condição não observada na norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004).

5.1.2 Propriedades do concreto fresco

Na avaliação de aspectos das propriedades do concreto fresco para a pesquisa salienta-se critérios que foram necessários para o desenvolvimento de um concreto com reologia favoráveis para aplicação através de bombas, no qual ficou constatada a necessidade de se utilizar um concreto com a incorporação de mais cimento e areia para as dosagens utilizando resíduo. Isto ocorre devido ao concreto apresentar-se bastante áspero, ou seja, deficiência de argamassa para envolvimento dos agregados, resultante do impacto do resíduo na mistura, proporcionado pela textura, forma, estrutura e minerais constituintes do material. A dificuldade de se obter um concreto com abatimentos próprios para bombeável não foi contornado com acréscimos de aditivo superplastificante, sendo necessário um incremento do volume de pasta para se obter resultados satisfatórios visualmente e mensurável nos ensaios.

Os ajustes demonstraram que é possível obter concretos independentemente da proporção de substituições, seja no miúdo ou graúdo, com bons aspectos e com a possibilidade de aplicação como concreto estrutural bombeável, afirmação confirmada por meio do ensaio de abatimento de tronco cônico e análises por reometro.

A pesquisa identificou durante os estudos de dosagens que é necessário no controle de canteiro de obras um acompanhamento do ar incorporado para que não seja atingido valores representativos, acima de 5%, que venha a impactar nas propriedades do concreto endurecido, isso porque a pesquisa identificou para algumas dosagens valores significativos de ar incorporado mesmo sem a utilização de aditivo incorporador de ar.

O reometro demonstrou que quase todos os concretos obtiveram resultados similares ao referência com exceção do 100%AM, onde existe uma área significativa de histerese e uma energia maior de torque, demonstrando que a mistura entre os componentes não foi eficaz quanto as outras dosagens.

5.1.3 Propriedades do concreto endurecido

Todas características da constituição do resíduo, juntamente com o nível de interação entre as partículas constituintes do sistema comentados anteriormente, resultam nas propriedades do concreto endurecido, e por conseguinte no produto final confeccionado com o concreto no qual deverá obedecer aos estados limites últimos e de serviço. Para isso, a propriedade da resistência à compressão é a que exprime e mede universalmente a qualidade do concreto e é utilizada como parâmetro inicial em projetos estruturais, sendo que os concretos na sua grande maioria da pesquisa obtiveram valores significativos, atendendo o fck de 20 MPa com fcj aos 28 dias de 26,6 MPa, considerando condição de preparo A, para classe de agressividade ambiental I. O crescimento da resistência ocorre em média de 24% de 8 para 28 dias e 8,75% de 28 para 91 dias.

Cuidados especiais devem ser dispensados para aquelas concretagens onde existem riscos de ocorrência de fissuras de origem térmica, pois existem acréscimos de até 23% no consumo de cimento equivalente.

As eficiências para resistência à compressão obtidas para os concretos que atingiram melhor desempenho variou entre 0,087 MPa/Kg a 0,108 MPa/kg, sendo este último referente ao concreto 100%AM. São valores corriqueiros de obtenção para os estudos de dosagem levando em consideração que o cimento utilizado foi o CP IV 32. O concreto de referência obteve o valor de 0,123 MPa/kg, 14% superior ao melhor concreto com resíduo. Isto demonstra que mesmo acarretando uma perda de eficiência pela utilização do resíduo, ainda é possível a aplicação do concreto para algumas combinações.

Analisando estatisticamente e agrupando os concretos pelo método de Duncan com objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si, os concretos considerados melhores em valores absolutos de resistência foram o REF, 100%AM, 100%AM100%AG. Avaliando o que possivelmente proporcionou este comportamento verifica uma influência da quantidade de agregado total nas dosagens, quantidade de resíduo substituído e seus reflexos na zona de transição como o motivador dos resultados obtidos. Uma superposição de efeitos no qual quanto menor a quantidade de agregado e menor percentual de substituição resultam em boas respostas de resistência à compressão do concreto.

Os concretos com adição de pó de resíduo em substituição ao cimento não apresentaram ganhos de resistência que justificassem um efeito pozolânico do resíduo, principalmente de 28

para 91 dias. Apesar dos resultados de caracterização apontarem para um potencial de reatividade, isso não foi suficiente para desenvolver este efeito no concreto que refletisse na propriedade de resistência.

Para os resultados obtidos pelos ensaios para determinação do módulo de elasticidade, o comportamento observado foi a influência favorável na propriedade com o aumento de agregado total (Figura 4.12), sendo que os concretos com substituições maiores por resíduo provavelmente obteriam bons resultados ou superiores ao referencial caso os volumes de agregados permanecessem iguais para todas as dosagens. Mesmo assim, os concretos 8AD, 45%AG e 100%AG alcançaram valores tão próximos ao referencial que foram considerados estatisticamente iguais.

Valores expressivos de módulo de elasticidade foram obtidos, chegando a 38 GPa, com nenhum concreto abaixo de 28 GPa. Analisando os módulos de elasticidade influenciando nos deslocamentos estruturais e na retirada de escoramentos de estruturas corriqueiras, concretos realizados com estes resíduos provavelmente não impactariam na dinâmica da obra e tão pouco nos cálculos de deformacionais devido a magnitude dos valores obtidos. Isto é confirmado quando se verifica que os resultados obtidos na pesquisa estão superestimados quando comparado com os valores obtidos através das fórmulas de previsão do módulo por diversas normas apresentado na Figura 4.14.

Os ensaios de absorção de água apresentaram que todos os concretos atingiram valores significativos de absorção, classificados pelo CEB-192, como concretos de alta absorção. Por isso é necessário estudos com concretos de relação água cimento mais baixas para obtenção de concretos com menores valores de absorção, possibilitando com isso dificultar o transporte de agentes agressivos no meio poroso e também possibilitando aplicação em ambientes mais agressivos sem desencadear um processo de deterioração do concreto ou armadura.

A introdução de resíduo no concreto prejudicou a propriedade, sendo que alguns concretos chegaram a atingir valores de absorção de 10,80%, com isso recomenda-se a utilização de concretos com menores percentuais de resíduo para a mesma relação água cimento para que impacte menos na durabilidade. Não foi possível realizar uma correlação entre a propriedade de absorção com os valores de resistência à compressão.

Avaliando os resultados dos ensaios de abrasão-erosão, os concretos com substituições de resíduo no agregado grão apresentaram maior resistência ao desgaste superficial. O ensaio é comparativo e não deve ser avaliado isoladamente. Caso o concreto seja utilizado em

superfície hidráulica com fluxo de água em alta velocidade, o concreto que atenderia este ensaio, levando em consideração o adotado nas obras da Eletrobras Furnas, seria o 100%AM100%AG. Para o uso dos outros concretos seria necessário o estudo de outras dosagens com relação água cimento abaixo de 0,55, buscando atender valores abaixo de 4,0% de perda de massa por desgaste superficial.

As micrografias apresentaram nas imagens uma discrepância quanto ao grau de densificação na zona de transição entre as amostras apenas utilizando o agregado convencional e os com 100% de resíduo de porcelana. As imagens da região entre a pasta e agregado convencional demonstra uma região bastante consolidada e ancorada no agregado. Quando se observa esta mesma região na presença do resíduo, principalmente quando a superfície é a esmaltada, existe um distanciamento na zona de transição que com certeza prejudica o compósito.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

No decorrer deste trabalho, verificou-se a possibilidade de aprofundamento na temática, a qual pode ser realizada em trabalhos posteriores:

- estudar o resíduo das porcelanas como adição em substituição ao cimento, verificando o potencial de pozolanicidade para uma superfície específica próxima as superpozolanas.
 - analisar mais profundamente se existe uma variabilidade no resíduo que seja capaz de influenciar o meio de forma significativa para impactar nos resultados das expansões de reação álcalis-agregado.
 - pesquisar o resíduo quanto a reação álcalis-agregado na presença de outros tipos de cimento e adições minerais, levando em consideração períodos mais longos de avaliação e em amostras de concreto.
 - realizar estudos mais aprofundados buscando avaliar os concretos frente as questões de durabilidade, entendendo melhor os meios porosos, para análise do ataque por CO₂ e cloretos.
 - pesquisar o potencial da porcelana dentro da matriz cimentícia quanto a questões térmicas para finalidade do conforto térmico do ambiente construído.
- estudar as propriedades mecânicas, elásticas e de durabilidade para concretos com diferentes relações água cimento, verificando o comportamento das mesmas.

REFERÊNCIAS

ANGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005, 167 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ANEEL: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. www.aneel.gov.br. Acesso no dia 05 maio de 2016.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. Editora PINI, São Paulo-SP, 2000

ABCERAM: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Dados de Mercado de Isoladores Elétricos de Porcelana (2003). www.abceram.org.br. Acesso em: 20/04/2016.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738** - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro. 2003. 6 .

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** – Concreto Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007. 9 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5752** – Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro. 1992. 6p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211** – Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2009. 9 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. 1996. 8 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218** – Agregados –Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro. 2010. 3p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222** – Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-deprova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2010. 5 p.120

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223** – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro. 1998. 12 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522** – Concreto- Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro. 2008. 16 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro. 1995. 2 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2005. 3 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116** – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro. 2004. 12 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15557** – Agregados – Reatividade álcalis-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro. 2008. 11 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15557** – Agregados – Reatividade álcalis-agregado – Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro. 2008. 12 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15557** – Agregados – Reatividade álcalis-agregado – Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro. 2008. 05 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 11-2**: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria. Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro. 2004. 16 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30** – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001. 3 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45** – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006. 8 p.121

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 46** - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2001. 6 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.6 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53** – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2009. 8 p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65** – Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro. 2003. 4p.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67** - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 1998. 8 p.

AV, N.; UNAL, M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cem Concr Res** 2000;30(3):497–9.

BERALDO, A. L.; SHIROMA, L.; FERREIRA, G. C. S.; **Compósito de cimento Portland com adição de resíduos de isoladores de porcelana e de Pinus**. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis 5, 6 e 7 de Março de 2014 Guimarães, Portugal

BIGNOZZI, M. C.; SACCANI, A. Ceramic waste as aggregate and supplementary cementing material: A combined action to contrast alkali silica reaction (ASR). **Cement & Concrete Composites** **34** (2012) 1141–1148.

BIGNOZZI, M. C.; BONDUVA, S. Alternative blended cement with ceramic residues: corrosion resistance investigation on reinforced mortar. **Cem Concr Res** 2011;41(9):947–54.

BINICI, H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties, **Construction and Building Materials** **21** (2007) 1191–1197.

BINICI, H.; KAPUR, S.; AROCENA, J.; KAPLAN, H. The sulphate resistace of cements containing red trick dust and ground basaltic pumice with sub-microscopic evidence of intrapore gypsum and ettringite as strengtheners. **Cem Concr Compos** 2012;34(2):279–87.

BITENCOURT, C. S.; TEIDER, B. H.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V. C. Geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita, **Cerâmica** **58** (2012) 20-28.

BONETTI, A. N. **Desenvolvimento de massas cerâmicas para fabricação de isoladores elétricos: Propriedades Mecânicas**. 2009. 62 f. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BRAGA, J. A.; ROSÁRIO, L. C.; MARCHANTE, J. O.; **Resistência à Abrasão de Superfícies do Concreto**. In: IBRACON, 1983.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, no 136, 17 de julho de 2002.

BRASIL. Lei Federal nº 10.257, de 10 de Julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, no 11 de julho de 2001.

BRASIL. Lei nº 11.145, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, no 5, 08 de janeiro de 2007.

BRASIL. LEI Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

BRITO, J. A.; Cidade versus entulho. **Areia & Entulho**, p. 22-26, out/dez, 1999.

CACHIM, P. Mechanical properties of brick aggregate concrete. **Constr Build Mater** 2009;23:1292–7.

CAMPOS, M. A. **Estudo do reaproveitamento de isoladores elétricos de porcelana como agregado em concretos e argamassas**. 2009. 155 f. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2009.

CAMPOS, M. A. **Análise Microestrutural e das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos com isoladores elétricos de porcelana**. 2011. 155 f. Tese de Doutorado da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2011.

CARLES-GILBERGUES, A.; HORMAN, H. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1. Ed. São Paulo: In: IBRACON, 2014. 327 p.

- CARNEIRO, A. P.; Construction waste characterisation for production of recycled aggregate. Salvador/Brazil. *In: Waste materials in constructio*, 4, 2000. Leeds. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier, 2000. p. 825-835.
- CORREIA, JR.; DE BRITO, J.; PEREIRA, AS. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. **Mater Struct** 2006;39:169–77.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H.; HASPARYK, N. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. Ed. São Paulo: *In: IBRACON*, 2010, 325-335 p.
- CASCUDO, O. **Controle da corrosão em armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. Goiânia, Editora UFG/ São Paulo, PINI, 1997.
- DE BRITO, J.; PEREIRA, AS.; CORREIA, JR. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cem Concr Compos** 2005;27(4):429–33.
- DEBIEB, F.; KENAI, S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Constr Build Mater** 2008;22:886–93.
- EQUIPE DE FURNAS. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: Ensaio e Propriedades**. 1. Ed. São Paulo: PINI, 1997, Cap. 19, 1-15 p.
- FRANCK, R; JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K.F; DERKSEN, R. Utilização de rejeitos de isoladores de porcelana em concretos, em substituição parcial ou total dos agregados naturais. *In: IBRACON*, 46. 2004, Florianópolis. **Anais... In: IBRACON**, 2004.
- F. ANDREOLA, L. BARBIERI, M.C. BIGNOZZI, I. LANCELLOTTI, F. ANDROLINI, New blended cement from polishing and glazing ceramic sludge, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 7 (2010) 546–555.
- GIRARDI, A. C. C. **Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de argamassa**. 130 f. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2016.
- GUERRA, E. A.; CARMO, J. B. M.; FONTOURA, J. T. F.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. Abrasão do Concreto em Superfícies Hidráulicas.
- GUERRA, I. VIVAR, B.; LLAMAS, A.; JUAN; MORAN, J.. Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete, **Waste Management** 29 (2009) 643–646
- HALICKA, A, OGRODNIK, P, ZEGARDLO, B, Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. **Construction and Building Materials** 48 (2013) 295–305p.
- HIGASHIYAMA, H.; YAGISHITA, F.; SANO, M.; TAKAHASHI, O. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars Rusing ceramic waste as fine aggregate. **Constr Build Mater** 2012;26:96–101.
- HIGASHIYAMA, H.; SAPPAKITTUPAKORN, M.; SANO, M.; YAGISHITA, F. Chloride ion penetration into mortar containing waste aggregate. **Constr Build Mater** 2012;33:48–54
- JIMENEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNANDÉZ, J. M.; BRITO, J. de. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**: Elsevier, 2013.
- KHALAF, FM.; DE VENNY, AS. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. **J Mater Civ Eng** 2004;16(4):331–40.

KHALOO, AR. Properties of concrete using crushed clinker bricks as coarse aggregate. **ACI Mater J** 1994;91(2):401–7.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**. V.33, p.703-711, 2003.

KIOURANIS, A.; MIRANDA, L. F. R.; MELO NETO, A. A. Agregados Reciclados em Concretos: Uma análise crítica das propriedades e classificações estabelecidas em diferentes, *In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção São Paulo, 21 a 23 de Setembro de 2016.*

LEVY, SM.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cem Concr Res* 2004;34(18):1975–80.

MANSUR, MA.; WEE, TH.; CHERAN, LS. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Mater J** 1999;96(4):478–83.

MAZUMDER, AR.; KABIRE, A.; YAZDANI, N. Performance of overburnt distorted bricks as aggregates in pavement works. **J Mater Civ Eng** 2006;18(6):777–85.

LINTZ, R. C. C.; CAMPOS, M. A.; JACINTHO, A. E. P. de A.; PAULON, V. A.; BARBOSA, L. A. G. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adições de isoladores elétricos de porcelana em substituição ao agregado graúdo. *In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 34., 2008, Santiago. Anais... Santiago: ASAE, 2008.*

LOPEZ, LLAMAS, B.; JUAN, A.; MORAN, JM.; GUERRA, I. Eco-efficient concretes: impact of use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete. *Biosyst Eng* 2007;96(4):559–64.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1994. 456 p. v. 2.

MANSUR, MA.; WEE, TH.; CHERAN, LS. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Mater J** 1999;96(4):478–83.

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z. Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW). *In: Handbook of recycled concrete and demolition waste. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 47. UK, 2013.*

MAZUMDER, AR.; KABIRE, A.; YAZDANI, N. Performance of overburnt distorted bricks as aggregates in pavement works. **J Mater Civ Eng** 2006;18(6):777–85.

MCNEIL, K.; KANG, T.H.K. Recycled Concrete Aggregates: A Review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**. V.7, N.1, p. 61-69, 2013.

MEDINA, C.; FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, MI. Microstructure and properties of recycled concretes using sanitary ware industry waste as coarse aggregate. **Constr Build Mater** 2012;31:112–8.

MEDINA, C.; SÁNCHEZ DE ROJAS, MI.; FRÍAS, M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. **Cement Concrete Composite** 2012;34:48–54.

MEDINA, C.; BANFILL, PFG.; SÁNCHEZ DE ROJAS, MI.; FRÍAS, M. Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demiltion waste. **Constr Build Mater** 2013;40:822–31.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014, vol.1, 110-119 p.
- MIRANDA, L.F.R. **Estudos de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- MIRANDA, L.F.R. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil**. 2005. 473 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Porto Alegre, UFRGS, 1987. (CE-17/87)
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto** 2. Ed. São Paulo: PINI, 1997, 366-385 p.
- OLIVEIRA, I. R. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo, Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.
- PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Constr Build Mater** 2010;24:832–8.
- PEREIRA DE OLIVEIRA, LA.; CASTRO GOMES, JP.; SANTOS, PMS. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. **Constr Build Mater** 2012;31:1971–7.
- PINTO, T. C. N. O.; SILVA, M. C. E. S. P. Riscos à saúde dos trabalhadores nos processos brasileiros de reciclagem de resíduos de construção e demolição. FUNDACENTRO. www.fundacentro.org.br. Acesso em: 25/03/2015.
- PINTO, T.P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.
- POON, CS.; CHAN, D. Paving blocks with recycled aggregate and crushed clay brick. **Constr Build Mater** 2006;20(8):569–77.
- PORTELLA, K. F., JOUKOSKI A., FRANCK R., DERKSEN, R. **Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto: determinação do desempenho sob envelhecimento acelerado**. **Cerâmica** 52. p. 155-167, 2006.
- RASHID, MA.; HOSSAIN, T.; ISLAM, MA. Properties of higher strength concrete with crushed brick as coarse aggregate. **J Civ Eng (IEB)** 2009;37(1):43–52.
- RIBEIRO, A.; VENINA DOS SANTOS, V.; BRANDALISE, R. N. Resíduos de isoladores elétricos cerâmicos - caracterização e utilização em concretos. *In*: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. 5 a 7 de Março de 2014. Guimarães, Portugal 2014.
- SALLES, F. M.; OLIVEIRA, P. J. R.; ROCHA FILHO, C. M. A abrasão em Concretos de Superfície Hidráulica: Testes e Fatores de Influência.
- SANTOLAIA, A. P. P.; CARDIN JUNIOR, W. H.; LINTZ, R. C. C.; BOZZA, J. L. Utilização da adição de resíduo de porcelana no concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: *In*: IBRACON, 2007.

- SÁNCHEZ DE ROJAS, MI.; MARIN, F.; RIVERA, J.; FRIAS, M. Morphology and properties in blended cements with ceramic wastes as a pozzolanic material. **J Am Ceram Soc** 2006;89(12):3701–5.
- SENTHAMARAI, R. M.; DEVADAS MANOHARAN, P. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement & Concrete Composites**, 27., p. 910-913, 2005.
- SENTHAMARAI, R.M.; DEVADAS MANOHARAN, P.; D. GOBINATH, D. Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties. **Construction and Building Materials** 25 (2011) 2413–2419.
- SOUZA SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, v. 1 e 2, 1992.
- TOLEDO FILHO, RD.; GONÇALVES, JP.; AMERICANO, BB.; FAIRBAIN, EMR. Potential for use of crushed waste calcined clay brick as supplementary cementitious material in Brazil. **Cem Concr Res** 2007;37(9):1357–65.
- TORKITTIKUL, P.; CHAIPANICH, A. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. **Cem Concr Compos** 2010;32:440–9.
- ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. 2011. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 5. Ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984, 199-319 p.
- WATANABE, K.; ISHIKAWA, M.; WAKAMATSU, M.. Rheology of castable refractories. **Taikabutsu Overseas**, v. 9, n. 1, 1989. p. 41-53.

ANEXO A

Determinação do melhor percentual de agregados natural/resíduo

O estudo para determinação do melhor percentual de agregados de resíduo substituindo o natural foi realizado em argamassa, possibilitando com isso a ausência do agregado graúdo como mais uma variável interferindo nos resultados. Para isso foram moldados corpos de prova 5 cm x 10 cm de dimensão, nas combinações de proporções entre o agregado artificial do resíduo versus natural: 25%-75%, 50%-50%, 75%-25% e 100%;

O traço da argamassa moldada foi de 1:3 (cimento:areia artificial), utilizando CP IV 32, areia artificial e natural, sem presença de aditivo e fixando o índice de consistência em 190 ± 10 mm. A determinação da consistência foi realizada no aparelho para determinação da consistência de argamassa normal. O fator água/cimento variou em função da trabalhabilidade que a mistura proporcionou, verificando a menor água de consistência e maior resistência à compressão para as diferentes combinações.

Na Tabela A-1 estão os traços, as propriedades da argamassa fresca, os resultados individuais e a média de resistência à compressão, das misturas que foram moldadas seguindo os parâmetros da NBR 7215/1996.

Tabela A-1 - Traço e Resistência à compressão de argamassas para avaliação da melhor composição entre areias

Composição entre areia natural e artificial													
Areia Natural (%)	Areia Artificial (%)	Cimento (g)	Areia Artificial (g)	Areia Natural (g)	Consistência (mm)	Água de Consistência (g)	A/C	Resistência à compressão (MPa)					
								3 dias		7 dias		28 dias	
								Individuais	Média	Individuais	Média	Individuais	Média
100	0	624	1872	0	191	300	0,48	29,1	27,8	35,0	35,5	40,0	40,2
								27,5		36,2		41,5	
								28,9		35,0		39,2	
								29,1		35,9		40,1	
75	25	624	1404	468	197	320	0,51	26,0	26,1	34,5	34,0	37,3	37,0
								26,2		34,5		38,6	
								26,1		33,0		37,1	
								26,1		34,1		34,8	
50	50	624	936	936	182	327	0,52	28,1	28,8	36,0	37,0	43,7	43,5
								28,8		36,1		42,8	
								29,3		37,4		44,1	
								29,0		38,6		43,2	
25	75	624	468	1404	186	331	0,53	28,4	28,2	37,8	36,7	42,4	42,6
								28,6		36,2		43,1	
								26,8		36,1		44,0	
								29,1		36,6		41,0	
0	100	624	0	1872	199	380	0,61	24,0	23,8	34,0	33,0	42,1	41,6
								22,4		31,8		40,7	
								23,9		33,1		42,3	
								25,0		32,9		41,3	

A mistura que apresentou melhor desempenho para todas as idades de ruptura foi a 50 % de material natural e 50 % de areia artificial proveniente do resíduo. Isso provavelmente foi

devido ao melhor empacotamento entre os grãos proporcionado pelo material pulverulento presente no resíduo e pela combinação das faixas granulométricas dos materiais envolvidos.

Como estudo complementar, foi verificado quanto o agregado proveniente do resíduo poderia contribuir para a argamassa sem se preocupar com a trabalhabilidade, então fixou a relação água/cimento e foi utilizado aditivo superplastificante para viabilizar a moldagem. Na Tabela A-2 estão os resultados obtidos de resistência à compressão para as substituições estudadas. O ganho de resistência foi acompanhado do aumento de resíduo incorporado a argamassa. Devido à pequena zona de transição, baixa relação água/cimento, a resistência do agregado torna-se o controlador da propriedade, e como o resíduo possui grande dureza, contribuiu para a elevada resistência à compressão.

Tabela A-2 - Resistência à compressão de argamassas com a/c 0,48

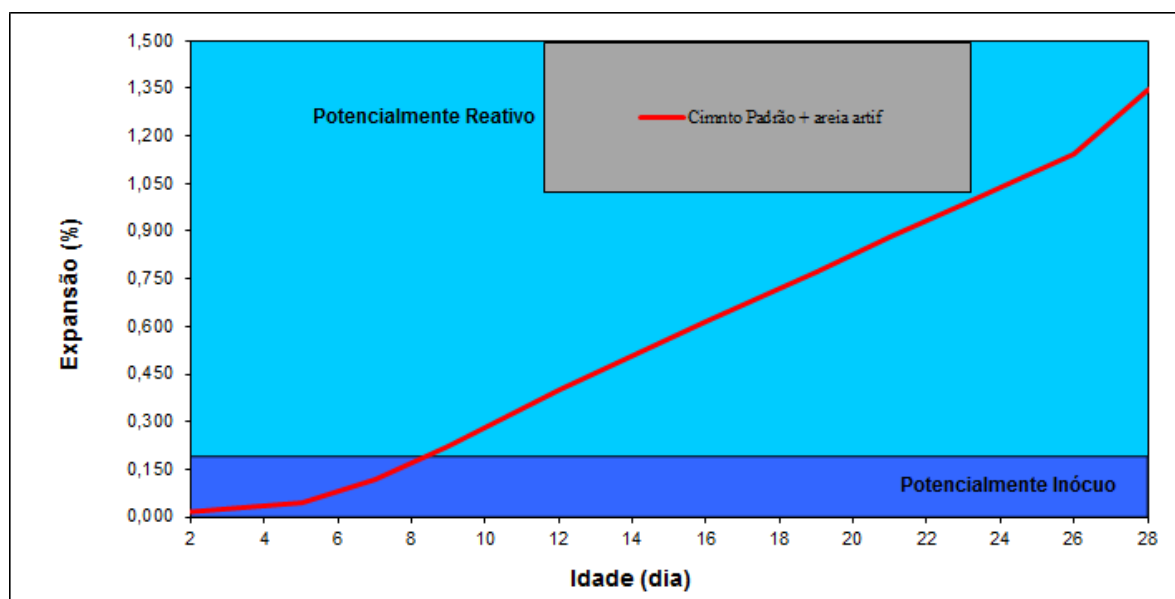
Composição entre areia natural e artificial										
Areia Natural (%)	Areia Artificial (%)	Consistência (mm)	Água de Consistência (g)	A/C	Resistência à compressão (MPa)					
					3 dias		7 dias		28 dias	
					Indivíduos	Média	Indivíduos	Média	Indivíduos	Média
100	0	191	300	0,48	29,1	27,8	35,5	35,5	40,0	40,2
					27,5		36,2		41,5	
					28,9		35,0		39,2	
					29,1		35,9		40,1	
75	25	185			27,1	26,7	38,4	38,6	44,7	44,0
					26,1		39,1		44,1	
					27,1		38,5		43,3	
					26,6		38,3		44,0	
50	50	182			29,0	29,5	42,9	42,7	51,6	51,1
					29,7		43,0		50,7	
					29,5		42,1		51,0	
					29,9		42,9		51,1	
25	75	185			31,6	32,0	47,2	47,3	53,2	53,2
					32,4		47,7		51,8	
					32,2		47,0		53,7	
					31,8		47,2		53,9	
0	100	141	38,4	38,8	48,3	49,2	60,6	64,3		
			38,7		48,3		66,3			
			39,1		52,1		66,0			
			38,9		48,0		---			

ANEXO B

Ensaio complementares **Reatividade álcalis-agregado pelo método acelerado**

Para utilização do resíduo é primordial testes para verificação do potencial reativo do agregado quanto à reatividade álcali-agregado, e para isso foi realizado moldagens do resíduo com o cimento padrão, que possui características de alto teor de álcalis e propicia desencadear a reação caso exista elementos no agregado que propiciaram. Na FiguraB-1 está apresentada a linha de crescimento das expansões com a idade.

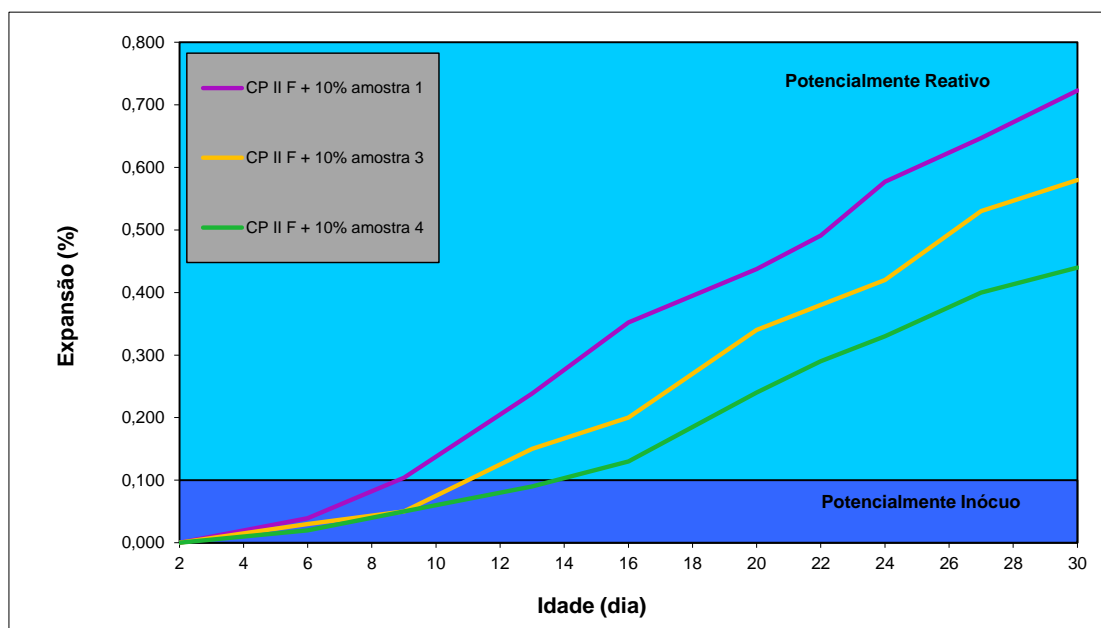
Figura B-1 - Gráfico das expansões pela idade de ensaio – Cimento Padrão



O gráfico apresentou uma expansão aos 30 dias bem representativo, da ordem 1,46 %, ultrapassando o limite da norma NBR 15577-1/2008 no qual preconiza para que o material seja considerado potencialmente inócuo, o resultado das expansões não devem ultrapassar 0,19 %.

Numa tentativa do próprio material inibir o agregado reativo, tentou-se utilizar do pó do resíduo como uma adição inibidora. Para isso foi feito testes com o decorrer da moagem, para visualizar o comportamento do material com o aumento da finura. Na FiguraB-2, as linhas das expansões apresentaram uma queda da reatividade em função que o material foi afinando, mas não foi suficiente para que ocorresse a mitigação das expansões.

Figura B-2 - Gráfico das expansões dos cimentos compostos com o pó do resíduo



Na Tabela B-1 está a composição química dos álcalis presentes no cimento padrão utilizado para o ensaio de reatividade acelerada em combinação com a areia artificial do resíduo de porcelana.

Tabela B-1 - Composição química dos álcalis do cimento padrão

Composição química (%)		
Álcalis Totais	óxido de sódio (Na ₂ O)	0,39
	óxido de potássio (K ₂ O)	1,14
	Equiv. alcalino	1,14
Álcalis Solúveis em Água	óxido de sódio (Na ₂ O)	0,23
	óxido de potássio (K ₂ O)	0,70
	Equiv. alcalino	0,69

ANEXO C

Resultados individuais dos ensaios da pesquisa

Tabela C-1 – Resultados individuais dos ensaios da pesquisa

% resíduo	Resistência á Compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (Gpa)			Absorção (%)			Abrasão-erosão (%)	
	8 dias	28 dias	90 dias	8 dias	28 dias	91 dias	8 dias	28 dias	90 dias	28 dias	91 dias
Ref	29,0	36,2	38,2	32,3	40,2	40,6	6,08	6,17	5,79	7,8	7,5
	30,4	37,2	39,0	34,9	38,8	39,0	5,93	6,38	6,42	8,6	9,1
	28,9	36,4	-	33,5	35,8	37,1	5,88	6,33	6,19	-	-
100%AM 100%AG	27,9	37,4	34,8	28,4	29,0	35,0	8,57	8,75	8,68	4,5	3,7
	28,8	38,4	38,4	29,0	33,8	32,8	9,09	8,46	8,31	5,2	3,6
	28,6	36,3	38,6	29,8	32,4	32,2	8,82	8,93	8,75	-	-
100% AM	29,5	35,9	38,0	29,6	32,4	35,7	9,32	6,84	7,01	7,9	4,7
	26,6	37,8	39,0	30,7	34,2	35,6	8,37	7,04	6,43	8,3	6,3
	27,6	38,0	35,6	31,9	32,8	34,1	8,30	6,89	6,08	-	-
50% AM	25,6	32,7	31,0	27,7	31,3	35,5	8,75	7,47	7,01	6,9	7,5
	24,3	27,1	30,4	31,6	28,0	36,7	7,93	7,83	7,13	8,2	9,4
	23,6	-	29,5	27,2	26,7	34,2	8,98	7,39	7,51	-	-
8%AD	23,3	31,3	26,4	31,5	35,9	37,6	6,88	6,75	6,53	6,5	6,5
	23,8	29,4	30,4	33,7	41,0	36,0	6,40	6,57	6,23	8,9	7,8
	21,5	31,0	27,5	29,5	33,5	38,5	6,57	6,12	6,68	-	-
45%AG	26,6	29,4	34,5	37,1	40,0	32,7	6,05	6,83	6,96	5,8	5,6
	27,6	31,5	34,1	32,4	36,4	41,9	6,09	7,19	6,83	6,9	6,9
	24,9	27,1	35,7	31,4	38,4	37,4	6,05	7,13	6,92	-	-
100%AG	22,7	30,4	36,9	33,6	38,2	39,5	7,52	7,05	7,04	4,3	4,1
	28,4	28,4	31,8	31,8	37,0	38,3	7,76	7,42	7,42	5,3	5,4
	28,3	29,1	36,4	32,5	36,5	38,8	7,63	7,26	7,27	-	-
8%AD 50%AM 45%AG	20,3	25,0	27,3	37,2	32,0	33,3	8,71	8,27	8,56	6,2	6
	19,7	25,3	31,3	28,1	31,1	33,3	8,62	8,31	8,29	7,9	7,2
	21,2	24,6	29,7	29,7	32,1	30,1	8,66	8,37	8,51	-	-
8%AD 100%AM 100%AG	15,1	26,0	30,0	25,9	30,8	32,3	10,11	9,45	10,65	5,5	5,3
	17,1	24,8	30,4	26,8	29,9	34,0	10,56	9,38	10,38	7,9	7,1
	19,9	26,9	31,7	27,6	31,2	30,8	10,73	9,77	11,37	-	-
8%AD 50%AM	25,6	32,6	36,9	30,3	33,0	34,3	6,94	7,00	8,15	7,4	7,2
	24,8	31,2	37,6	31,1	32,4	32,9	7,07	6,97	7,59	8,6	8,7
	24,5	32,0	35,5	30,3	32,7	32,2	6,67	6,90	7,63	-	-
50%AM 45%AG	24,6	25,5	30,8	28,6	31,7	33,2	8,93	8,55	8,28	6,1	5,9
	21,4	23,1	29,5	29,8	30,2	32,6	9,21	9,25	8,42	6,2	6,6
	22,4	21,1	29,5	27,4	30,8	32,7	9,07	8,91	-	-	-