



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

LEANDRO SHIROMA

**ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RESÍDUOS DE ISOLADORES
DE PORCELANA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

**CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2016**

LEANDRO SHIROMA

**ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RESÍDUOS DE ISOLADORES
DE PORCELANA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

*Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da
Universidade Estadual de Campinas como parte dos
requisitos exigidos para obtenção de título de Doutor em
Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e
Ambiência*

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO LUDOVICO BERALDO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
LEANDRO SHIROMA, ORIENTADO PELO
PROF. DR. ANTONIO LUDOVICO BERALDO

CAMPINAS

FEVEREIRO DE 2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Sh66r Shiroma, Leandro, 1975-
Atividade pozolânica de resíduos de isoladores de porcelana em matrizes
cimentícias / Leandro Shiroma. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Antonio Ludovico Beraldo.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Agrícola.

1. Porcelana. 2. Isoladores e isolamentos elétricos - Reaproveitamento. 3.
Reciclagem. 4. Fluorescência de Raios-X. 5. Difração de Raios-X. I. Beraldo,
Antonio Ludovico, 1951-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Pozzolanic activity of insulators porcelain waste in cementitious
matrices

Palavras-chave em inglês:

Porcelain

Insulation (Electric) - Reutilization

Recycling

X-ray fluorescence

X-Ray diffraction

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiente

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Antonio Ludovico Beraldo [Orientador]

Michelle Santos Rodrigues

Lia Lorena Pimentel

Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira

Julio Soriano

Data de defesa: 26-02-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado defendida por Leandro Shiroma, aprovada pela Comissão Julgadora em 26 de fevereiro de 2016, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do discente.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Marlene (*in memoriam*) e José, aos
meus irmãos e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Antonio Ludovico Beraldo, pela orientação, confiança, incentivo e dedicação ao longo desses sete anos.

À Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL, pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos – LabEnd, da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI.

Aos técnicos Paulo Nunes e José Maria da Silva, pela ajuda na realização de ensaios.

À minha querida família, pela compreensão.

RESUMO

Com a Lei 12.305, instituindo a nova Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, em vigor desde agosto de 2010, o setor empresarial se viu pressionado a adotar em seu planejamento estratégico ações que visem à disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos gerados no processo produtivo. Com este cenário, houve necessidade da Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL aprimorar a gestão de descarte de resíduos utilizada, já que se trata de um processo bastante complexo, devido à diversificação de itens e à diversidade tecnológica dos materiais envolvidos. Dentre os principais materiais de descarte passíveis de se agregar valor, destacam-se os resíduos de isoladores de porcelana (RIP), com um montante aproximado de 388 ton/mês. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi o de avaliar a utilização do RIP como material pozolânico em matrizes cimentícias. Os isoladores descartados foram submetidos a um processo de fragmentação (britagem e moagem) até se obter uma granulometria de 45 µm, sendo posteriormente caracterizado através de ensaios químicos, físicos tendo sido comparados com um material pozolânico comercial intensamente estudado, a cinza de casca de arroz (CCA). Vale destacar nesta fase de caracterização do RIP, a avaliação ambiental efetuada, conforme ABNT NBR 10.004 (2004), que classificou o resíduo como Classe I (perigoso) e fez com que fosse determinada a origem da contaminação e possíveis ações para sua eliminação. Destacou-se também o ensaio de avaliação da pozolanicidade por meio do ensaio de condutividade elétrica, que se mostrou um método rápido de avaliar tanto o RIP como a CCA. Os resultados dos ensaios de caracterização química e física mostraram que o teor ideal de substituição do cimento por RIP seria de, no máximo, 10%. Tanto os resultados dos ensaios de caracterização do RIP quanto da pasta com cimento Portland mostraram que o RIP apresentou características de um material pozolânico.

Palavras chave: difração de Raios - X, Fluorescência de Raios - X, cimento Portland, pozolana, resíduos, isolador de porcelana, porosimetria

ABSTRACT

The new National Politics on Solid Waste, established in August 2010, forced the business sector to adopt in their planning actions the proper disposal of the waste generated in the production process. The waste disposal management of an electric company is a very complex process due to the varieties of items, the technological diversity of the materials involved. In this context, CPFL took the initiative to improve their residue management system. Among the main wastes generated which can add value is the electrical porcelain insulators waste (EPI), with an approximate amount of 388 ton/month. So, the object of this study was to evaluate the use of the insulators waste as pozzolanic material in cement matrices. The insulators wastes were submitted to a fragmentation process (crushing and grinding) to obtain a particle size of 45 μm . The insulator waste was characterized by chemical, physical tests were compared with a commercial material intensively studied, the rice husk ash (RHA). Especially in this EPI characterization phase, is the environmental assessment, according to NBR 10.004 (2004) and also the evaluation test of pozzolanicity through the measuring the electrical conductivity, which showed a rapid method of evaluating the EPI as it was for other materials widely studied as the RHA. The results of chemical and physical tests characterizations showed that the optimum content of the cement replacement by EPI would be at most 10%. The results of EPI test for characterization of the slurry with Portland cement paste showed that the EPI showed characteristics of a pozzolanic material.

Key-words: X-ray diffraction; X-ray diffraction, Portland cement, pozzolan, waste, porcelain insulator, porosimetry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxo das etapas de resíduos gerados no processo CPFL.....	24
Figura 2. (a) Armazenamento de isoladores de porcelana na EA; (b) Detalhe do isolador.	25
Figura 3. Adaptação de uma representação gráfica da hidratação do cimento pelo método da calorimetria.	42
Figura 4. DRX do cimento CPV-ARI.	46
Figura 5. Container para disposição dos isoladores cerâmicos na EA's	47
Figura 6. Resíduos de isoladores de porcelana inservíveis.	48
Figura 7. Moinho-de-mandíbulas (a) e Moinho-de-martelos (b).	49
Figura 8. Material moído.....	49
Figura 9. Moinho-de-bolas (a) e material moído.	50
Figura 10. Fluxograma das etapas de caracterização química e física.	51
Figura 11. (a) Preparação da amostra. (b) Equipamento de DRX – Philips.....	52
Figura 12 – Equipamentos utilizados para medir a condutividade elétrica do sistema CH/RIP.	54
Figura 13 – Equipamento de MEV com espectroscopia de Raios – X por EDS.....	56
Figura 14. Multiplicnômetro a gás hélio.	57
Figura 15. Jogo de peneira Quimis.....	58
Figura 16. Aparelho de Vicat.....	61
Figura 17. Preparação da pasta (a) e (b).....	63
Figura 18. Filtragem da pasta.....	63
Figura 19. Armazenamento em tubos Eppendorf.....	63
Figura 20. Ultrassom, modelo: USLab.....	66
Figura 21. Difratomogramas do RIP e CCA.	73
Figura 22. (a) Conjunto isolador de porcelana e haste- pino de topo, (b) isolador com fragmento da haste, (c) haste – pino de topo com rosca em chumbo e alumínio.	74
Figura 23. MEV e EDS do material utilizado na fabricação da rosca da haste pino de topo.....	75
Figura 24. Granulometria do cimento CPV-ARI vs RIP.....	78

Figura 25. Curva de perda de condutividade elétrica versus tempo para a solução de RIP e CCA	79
Figura 26. MEV do RIP após processo de britagem.	80
Figura 27. MEV e EDS do RIP após processo de moagem	81
Figura 28a e 28b. MEV da cinza da casca de arroz.	81
Figura 29a e 29b. Micrografias da cinza de casca de arroz.....	82
Figura 30. Cinética de temperatura para RIP.	83
Figura 31. Resistência à penetração da pasta.	85
Figura 32. Tempo de início e fim de pega em função do teor de substituição.	86
Figura 33. Evolução do consumo de CH nas pastas de CH/ RIP em função da idade.....	88
Figura 34. Porcentagens de água combinada dos produtos hidratados das pastas de CH/ RIP em função das idades de cura.....	88
Figura 35. Evolução do consumo de CH nas pastas de CIM/ RIP em função da idade.....	90
Figura 36. Porcentagens de água combinada dos produtos hidratados das pastas controle e pastas CIM/RIP em função das idades de cura.	91
Figura 37. Difrátogramas de raios-X das pastas controle e CIM/RIP aos 28 dias de cura.....	92
Figura 38. Difrátogramas de raios - X das pastas controle e CIM/RIP aos 365 dias de cura.....	93
Figura 39. Resistência à compressão simples em função do teor de substituição de cimento por RIP.	96
Figura 40. Valores das médias de resistência à compressão simples em função da idade de cura.	97
Figura 41. Distribuição dos tamanhos dos poros aos 28 dias.....	99
Figura 42. Porosidade das pastas (%) em função do teor de substituição.....	100
Figura 43. Velocidade do pulso ultrassônico (VPU) em função da idade (dias) e do teor de substituição de cimento por RIP (em %).	101
Figura 44. Pasta de cimento sem RIP com localização da (3) monossulfoaluminato de cálcio (AFm), (4) stratlingita.	102
Figura 45. Pasta de cimento sem RIP com a presença de etringita.	103
Figura 46. Pasta de cimento sem RIP mostrando a presença de CaCO_3	103
Figura 47. MEV CIM/10%- Posição 1,2 e 3 (CaCO_3).	104
Figura 48. MEV CIM/10%- Posição 4 (stratlingita).	105
Figura 49. MEV CIM/20%- Posição 3 (Stratlingita), 4(CaCO_3).....	106

Figura 50. MEV CIM/20%- Posição 5 Etringita.....	106
Figura 51. MEV CIM/30%- Posição 1 (stratilingita), 2 (SiO ₂). Posição 3 (etringita).....	107
Figura 52. MEV CIM/40%- Posição 8(CaCO ₃)......	108
Figura 53. MEV CIM/40%- Posição 9,10 (CaCO ₃) e 11 (C-S-H).....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade (kg) e Valor (R\$) dos principais materiais de descarte nas EAs paulistas – jan/2012-jul/2013*	24
Tabela 2. Percentagem de SiO ₂ encontrada na CCA, segundo vários autores	34
Tabela 3. Dados do processo de fragmentação.	50
Tabela 4. Ensaio realizado na pasta	59
Tabela 5. Quantidades de materiais utilizados para o ensaio de calorimetria	60
Tabela 6. Quantidades de materiais utilizados para o ensaio de tempos de pega.	61
Tabela 7. Quantidades de materiais utilizados para o ensaio de termogravimetria.....	62
Tabela 8. Teores de substituição utilizados na confecção dos corpos de prova no ensaio de compressão	68
Tabela 9. Números de corpo de prova.....	68
Tabela 10. Composição química (% em óxidos) e perda ao fogo (PF) do RIP e CCA.....	70
Tabela 11. Comparativo de Normas para materiais pozzolânicos.	71
Tabela 12. Classificação granulométrica após o processo de britagem.	77
Tabela 13. Diâmetro equivalente das partículas.....	77
Tabela 14. Efeito dos teores de substituição do cimento pelo RIP (em %) nos parâmetros da curva de hidratação.	84
Tabela 15. Tempos de início de fim de pega.....	85
Tabela 16. CH consumido (%) das pastas CH/RIP.	87
Tabela 17. CH consumido (%) das pastas CIM/RIP em diferentes idades de cura.....	89
Tabela 18. Minerais identificados pelo ensaio de DRX aos 28 dias.	94
Tabela 19. Minerais identificados pelo ensaio de DRX aos 365 dias.	94
Tabela 20. Análise de Variância (ANOVA) para compressão simples - Tipo III Soma dos quadrados.	95
Tabela 21. Classificação do tamanho de poros.	98
Tabela 22. EDS dos elementos químicos (% em peso) nas localizações 1, 2, 3 e 4.	104
Tabela 23. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 1, 2, 3 e 4.....	105
Tabela 24. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 3,4 e 5.	107

Tabela 25. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 1, 2 e 3.	108
Tabela 26. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 8	108
Tabela 27. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 9, 10 e 11.....	109
Tabela A228. Análise “Multiple Range Tests” para resistência à compressão, fator: idade -Method: 95,0 percent LSD	127
Tabela 29. Consumo de matérias-primas convencionais em uma máquina hidráulica.....	137
Tabela 30. Consumo de matérias-primas com teor de 10% de substituição de cimento ARI por RIP em uma máquina hidráulica.	138
Tabela 31. Consumo de matérias-primas com teor de 10% de substituição de cimento ARI por CCA em uma máquina hidráulica.	138
Tabela 32. Consumo de matérias-primas com teor de 10% de substituição de cimento ARI por metacaulim em uma máquina hidráulica.....	138

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCERAN – Associação Brasileira de Cerâmica

B.E.T - (*Brunauer-Emmett-Teller*)

CCA – Cinza de casca de arroz

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

DRX – Difração de Raios-X

EDS – Espectrometria de energia dispersiva de Raios-X

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EA – Estação Avançada

FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola

FRX – Fluorescência de Raios-X

GIR – Gestão Integrada de Recursos

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica

LRAC- Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração

LMCC- Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MME – Ministério de Minas e Energia

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NOS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas

PIB – Produto Interno Bruto

PNRS – Política Nacional de Resíduo Sólidos

PF – Perda ao Fogo

RIP – Resíduos de Isoladores de Porcelana

SIN – Sistema Integrado Nacional

SE–Subestações

SGA–Sistema de Gestão Integrada

TG – Termogravimetria

TBL – *Triple Botton Line*

WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development*

SUMÁRIO

1	Introdução e Justificativa	19
1.1	Hipótese do trabalho.....	20
1.2	Originalidade da pesquisa	20
2	OBJETIVOS	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	Gestão do resíduo sólido	22
3.2	Gestão de resíduos gerados pelo Grupo CPFL.....	22
3.3	Utilização de resíduos de materiais cerâmicos como agregados e material pozolânico ..	25
3.4	Utilização de resíduos de isoladores cerâmicos como agregado e material pozolânico ..	29
3.5	Adições minerais.....	31
3.5.1	Adições mais utilizadas no mercado	33
3.5.1.1	Cinza de Casca de arroz.....	33
3.5.1.2	Silica Ativa	34
3.5.1.3	Metacaulim	34
3.6	Caracterização dos materiais.....	35
3.6.1	Classificação Ambiental – NBR10.004 (2004).....	36
3.6.2	Fluorescência de Raios - X – FRX.....	37
3.6.3	Difração de Raios - X – DRX	38
3.6.4	Avaliação de pozolanicidade por condutividade elétrica	38
3.6.5	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e Espectroscopia de Raios - X por dispersão de Energia - EDS	39
3.6.6	Superfície Específica - BET	39
3.7	Caracterização físico-química e mecânica da pasta	40
3.7.1	Termogravimetria.....	41
3.7.2	Curva de hidratação.....	42
3.7.3	Tempo de pega	43
3.7.4	Porosimetria por intrusão de mercúrio	43
3.7.5	Ultrassom	44
3.7.6	Avaliação mecânica.....	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	Materiais.....	46
4.1.1	Cimento Portland.....	46
4.1.2	Hidróxido de cálcio	47
4.1.3	Resíduos de isoladores de porcelana (RIP)	47
4.1.4	Processo de Fragmentação	48

4.1.5	Cinza de casca de arroz (CCA)	50
4.2	Metodologia	51
4.2.1	Caracterização mineralógica e química do RIP	51
4.2.1.1	Fluorescência de Raios - X (FRX) e perda ao fogo (PF).....	51
4.2.1.2	Difração de Raios – X (DRX).....	52
4.2.1.3	Caracterização ambiental do RIP.....	52
4.2.1.4	Avaliação da pozolanicidade do RIP por condutividade elétrica	53
4.2.1.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de Raios - X por dispersão de energia (EDS).....	55
4.2.2	Caracterização física do RIP	56
4.2.2.1	Superfície específica - BET	56
4.2.2.2	Massa específica real	57
4.2.2.3	Distribuição granulométrica	57
4.2.2.4	Granulometria a laser.....	58
4.2.3	Estudo das pastas.....	58
4.2.3.1	Estudo da cinética da reação de hidratação.....	59
4.2.3.2	Ensaio de tempo de pega – NM 65 (2003)	61
4.2.3.3	Termogravimetria	62
4.2.3.4	Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	65
4.2.3.5	Difração de Raios - X (DRX) nas pastas	65
4.2.3.6	Ensaio não destrutivo por ultrassom.....	65
4.2.3.7	Ensaio de compressão simples.....	67
4.2.3.8	MEV das pastas	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
5.1	Caracterizações mineralógica, química, física e ambiental do RIP.....	70
5.1.1	Composição química e perda ao fogo	70
5.1.2	Difração de Raios - X (DRX).....	72
5.1.3	Caracterização ambiental do RIP – ABNT NBR 10.004 (2004).....	73
5.1.4	Massa específica real do RIP	75
5.1.5	Superfície Específica - BET	76
5.1.6	Distribuição do tamanho de partículas do RIP	76
5.1.7	Avaliação da pozolanicidade do RIP por meio do ensaio de condutividade elétrica	78
5.1.8	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e Espectroscopia de Raios - X por dispersão de Energia - EDS	80
5.2	Avaliação das pastas.....	82
5.2.1	Calor de hidratação.....	82

5.2.2	Determinação do tempo de pega	84
5.2.3	Termogravimetria.....	87
5.2.3.1	Pastas do sistema CH e RIP	87
5.2.3.2	Pastas do sistema Cimento e RIP	89
5.2.4	Difração de Raios - X das pastas.....	91
5.2.5	Compressão simples das pastas.....	95
5.2.6	Porosimetria por intrusão de mercúrio	98
5.2.7	Ultrassom	100
5.2.8	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e espectroscopia de Raios - X por dispersão de energia EDS nas pastas de cimento e RIP aos 28 dias	101
5.2.8.1	Pasta de cimento sem RIP.....	101
6	CONCLUSÕES	110
7	SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO	111
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
	Anexo A - Análise Estatística “ <i>Multiple Range Tests</i> “.....	126
	Anexo B – Análise Ambiental – ABNT NBR 10.004 (2004).....	128
	Anexo C – Granulometria Laser.....	132
	Anexo D –Análise Econômica	135

1 Introdução e Justificativa

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a capacidade instalada para geração de energia em 2013 é de 126 mil MW, com previsão de crescimento da demanda em 2018, para 167,10 mil MW. Em 2018, a matriz energética será distribuída da seguinte forma: usinas hidrelétricas – 63,73% da matriz de energia elétrica brasileira, seguido pela fonte termoeleétrica com 12,50%, a nuclear (2,03%) e a solar/eólica (21,72%) (Sistema Integrado Nacional, 2016). Em paralelo a esta expansão, a preocupação ambiental ganha força com a nova Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (LEI 12.305, 2010). Este fator ambiental compõe um dos pilares da sustentabilidade juntamente com os fatores sociais e econômicos. As empresas, além de serem responsáveis por seus resíduos, devem criar políticas voltadas para o desenvolvimento e para o estímulo da cadeia de reciclagem, e apresentarem programas de capacitação social para os agentes participantes desse processo. Diante deste cenário vislumbra-se uma grande possibilidade de reaproveitamento ou de reúso dos materiais descartados pelo setor elétrico, em produtos com maior valor agregado, do que simplesmente direcioná-los aos aterros, sendo esta a prática atual mais corrente.

Este trabalho apresenta parte dos resultados do subprojeto - Artefatos Cerâmicos, dentro de um projeto mais amplo intitulado - Matriz *High Tech* de Reúso e Descarte Limpo na CPFL, financiado com recursos do programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (PA0037 – 2011) e contou também com o apoio da Companhia Paulista de Força e Luz/CPFL - SP/Brasil.

O objetivo deste trabalho foi o de avaliar as características dos resíduos de isoladores de porcelana (RIP), como um material pozolânico e sua utilização em substituição parcial ao cimento Portland. Para auxiliar na caracterização, o RIP foi comparado a um material com propriedades conhecidas, a cinza de casca de arroz (CCA). Os RIP representam um dos maiores volumes gerados, conforme levantamentos realizados nas concessionárias do Grupo CPFL, totalizando 388 ton/mês, acarretando, dessa forma, um sério problema quanto à logística de transporte e de sua destinação final.

1.1 Hipótese do trabalho

Com a diminuição do tamanho de partícula dos resíduos de isoladores de porcelana (RIP) para 45µm esperava-se obter um material que apresente elevada reatividade química, para que possa vir a ser utilizado como um material pozolânico em matrizes cimentícias.

1.2 Originalidade da pesquisa

Nos últimos anos, os resíduos de isoladores de porcelana (RIP) do setor elétrico têm despertado interesse de estudos, sendo, portanto, uma oportunidade de encontrar novas aplicações ou rota tecnológica. O reúso desse resíduo como um material pozolânico em matrizes cimentícia é ainda recente, assim como a possibilidade de sua aplicação em produtos de concreto.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Neste trabalho, o objetivo principal foi o de avaliar o desempenho dos resíduos de isoladores de porcelana (RIP) provenientes do descarte da rede elétrica, como material pozolânico em substituição parcial ao cimento Portland.

Objetivos específicos

- Estudar suas características químicas, físicas e mineralógicas,
- Avaliar a caracterização ambiental do RIP,

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Gestão do resíduo sólido

O conceito de desenvolvimento sustentável (ou sustentabilidade) foi estabelecido pela ONU em 1987 no relatório de Brundtland como: “[...] o desenvolvimento que vai de encontro com as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades”.

Em 1992, a Organização das Nações Unidas – ONU realizou, no Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento - CNUMAD. Também conhecida como Rio 92 ou “Cúpula da Terra” promoveu o acordo entre 179 países sobre o novo padrão de desenvolvimento sustentável mundial. O termo “Agenda 21” foi utilizado no sentido de desejo de mudança para esse novo modelo de desenvolvimento para o Século XXI (BRASIL, 2014). Com base nesse acordo, o Brasil começou a desenvolver e a implementar a sua Agenda 21.

Em 2010, foi sancionada a Nova Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010), que dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Destacam-se alguns pontos importantes na lei como a prioridade, nas aquisições e contratações governamentais para produtos reciclados, o poluidor-pagador e o protetor-recebedor, a responsabilidade compartilhada e o incentivo à implementação do ciclo de vida dos produtos, etc.

De forma local, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2015), começou a fortalecer a importância de uma adequada destinação dos resíduos sólidos, na qual seja necessária uma caracterização e segregação do resíduo, uma vez que para cada tipo de resíduo sólido (urbano, de serviço de saúde, industrial- classe I ou classe II) existem metodologias específicas para cada destinação.

3.2 Gestão de resíduos gerados pelo Grupo CPFL

A CPFL Energia é uma *holding* e se tornou uma empresa de energia completa, com negócios em distribuição, geração, comercialização de energia elétrica e serviços. Em 2014,

através de oito distribuidoras, concentradas nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul, atenderam 7,6 milhões de clientes, distribuídos em 569 municípios. O faturamento da empresa foi de R\$ 16,4 bilhões, e o investimento em atividades de pesquisa e desenvolvimento foi de R\$ 30,41 milhões. (CPFL, 2015).

A empresa utiliza o Sistema de Gestão Ambiental (SGA) com procedimentos e identificação de possíveis impactos causados nas diversas atividades desenvolvidas nos diferentes setores da empresa. A gestão de descarte de resíduos da CPFL constitui um processo bastante complexo, devido à diversidade e ao volume gerado, e ao constante aumento desse volume, sendo que a maioria dos materiais gerados possui uma rota de destinação já definida, conhecida como logística reversa.

De forma a conhecer diretamente a problemática da recepção de materiais e de gestão dos resíduos gerados pela empresa, acessou-se o inventário das 31 unidades instaladas nos municípios, conhecidas como Estações Avançadas – EA's e Sub-estações – SE's. Essas unidades são responsáveis pela coordenação dos projetos de novas instalações. O controle de entrada e saída de materiais é realizado por uma empresa terceirizada, a DHL, que abastece o sistema de dados do Grupo CPFL.

Também foram visitadas empreiteiras que são responsáveis pela manutenção da rede elétrica (serviços de campo), pelo controle de entrada e saída de materiais, pelos serviços de novas instalações e pelo abastecimento do sistema de dados do Grupo CPFL.

Os serviços executados pelas empreiteiras são fiscalizados pelo setor interno da CPFL que atesta a qualidade do serviço executado finalizando-se então o processo. Os resíduos gerados e inventariados pelo serviço de campo e pelas empreiteiras de todas as EA's são comercializados e transportados até a CPFL – Serviços, situada em São José do Rio Pardo, interior de São Paulo, que é responsável por destiná-los de maneira adequada. Na Figura 1, apresenta-se o fluxo das etapas de resíduos gerados nas EAs situadas no estado de São Paulo.

A CPFL também mantém convênios com algumas prefeituras para o programa de coleta seletiva de materiais recicláveis em suas unidades e de prestação de serviço em conjunto para efetuar podas de árvores, por exemplo.

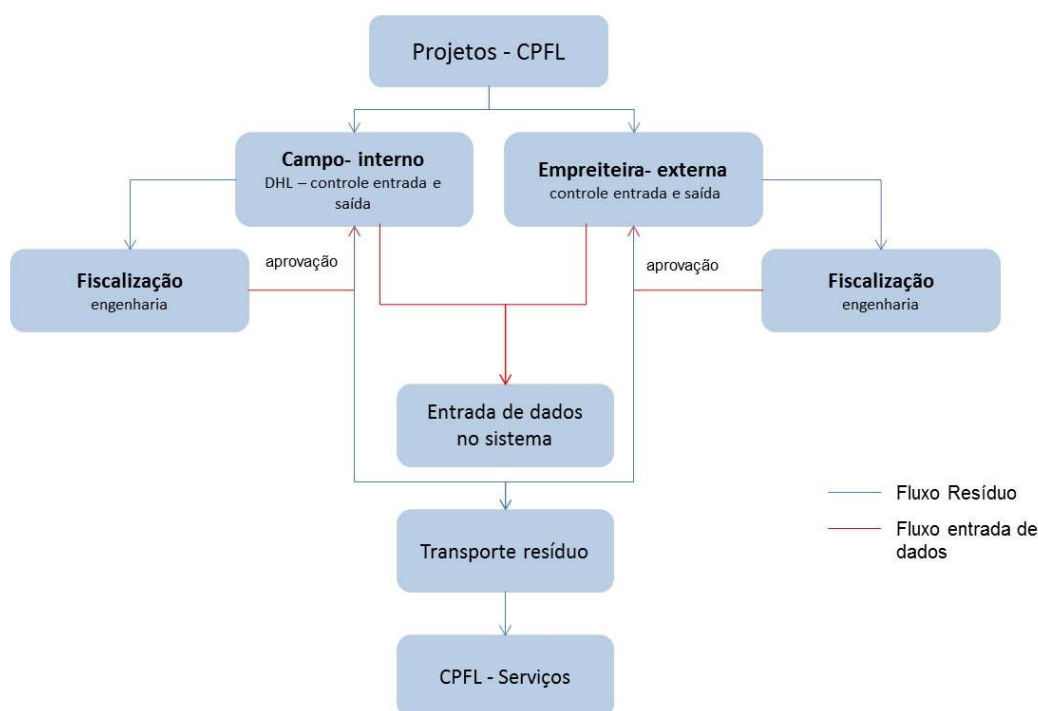


Figura 1. Fluxo das etapas de resíduos gerados no processo CPFL.

Na Tabela 1, pode-se observar que o isolador de porcelana descartado é um dos resíduos que apresenta um grande volume de geração, com 4,66 mil toneladas por ano, tornando-se um problema de logística e de disposição final.

Tabela 1. Quantidade (kg) e Valor (R\$) dos principais materiais de descarte nas EAs paulistas – jan/2012-jul/2013*

		POSTE DE CONCRETO		POSTE DE MADEIRA		PORCELANA	
		Kg	R\$	Kg	R\$	Kg	R\$
1	Paulista	25.011	164.702,22	3.401.200	289.529,29	6.282.685,30	1.236.331,59
2	Piratininga	7.282.500	76.229,43	9.382.800	77.418,77	243.549,30	500.683,42
3	Santa Cruz	3.364.500	56.721,75	280	5	40.167,90	82.223,10
4	Leste Paulista	1.621.500	21.130,69	2.896.800	4.825,43	29.427,30	69.814,46
5	Sul Paulista	1.774.500	15.219,12	504.560	5.931,27	10.181,9	15.435,74
6	Jaguari	517.500	4.541,87	7.330	433,31	3.289,90	1.987,02
7	Mococa	1.990.243	17.467,49	0			
		16.575.754	356.013	16.192.970	367.386	6.599.120	1.906.475

*17 meses

Os isoladores de porcelana são acondicionados em caçambas e direcionados à CPFL Serviços, que os destina a um aterro legalizado. Nas Figuras 2 (a) e (b), apresentam-se as formas como são acondicionados os isoladores de porcelana retirados da rede.



Figura 2. (a) Armazenamento de isoladores de porcelana na EA; (b) Detalhe do isolador.

Uma alternativa para a mudança desse modelo trivial seria a incorporação de tecnologias para o desenvolvimento de materiais mais elaborados, com maior valor agregado para a empresa. Em 1994, John Elkington definiu este conceito no meio empresarial - o *Triple Bottom Line* (TBL), onde as corporações não apenas visam o valor econômico, mas também os valores ambiental e social. Com inovações e novas rotas tecnológicas, o conceito criado por Elkington poderá ser aprimorado para um modelo socioambiental mais interessante em relação aos modelos de gestão atualmente aplicados. Assim, pode-se imaginar que seja possível utilizar os resíduos gerados pelas companhias de energia para gerar produtos de consumo e reduzir, por exemplo, os custos de instalações rurais. Esse grande desafio foi de encontro aos objetivos do programa “*LUZ PARA TODOS*”, do Governo Federal, iniciado em 2003 e estendido até 2018, cujo objetivo foi o de levar energia elétrica para pessoas do meio rural reduzindo a exclusão elétrica no país. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

3.3 Utilização de resíduos de materiais cerâmicos como agregados e material pozolânico

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM (2013), por cerâmica deve-se entender o conjunto de todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. Podem ser classificadas em subsetores ou segmentos em função de diversos fatores tais como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização, sendo listados a seguir:

Cerâmica Vermelha: Compreende materiais com coloração avermelhada, empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas).

Materiais de Revestimento (Placas Cerâmicas): São aqueles materiais, na forma de placas, utilizados na construção civil para revestimento, tais como: azulejos, pastilhas, porcelanatos, grês, lajotas, pisos etc.

Cerâmica Branca: Este grupo é bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e, em geral, recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor e que eram assim agrupados pela cor branca da massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas. Dessa forma é mais adequado subdividir este grupo em: louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística (decorativa e utilitária), cerâmica técnica para fins diversos, tais como: químico, elétrico, térmico e mecânico.

Materiais Refratários: têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, que em geral envolvem esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações. Dessa forma, pode-se classificar os produtos refratários quanto à matéria-prima ou quanto ao componente químico principal em: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnesianocromítico, cromítico-magnesiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

O descarte de resíduos de isoladores de porcelana (RIP) também se tornou motivo de preocupação em vários países. No Japão, em 2011, as empresas de energia: Tokyo Electric Co gerou 3.000 toneladas de resíduos de isoladores de porcelana (TEPCO, 2012), enquanto que a Kansai Electric Co gerou 3.800 toneladas (NGK, 2013). Por outro lado, pode-se observar que o índice de reciclagem dos resíduos gerados por essas empresas foi quase total, sendo os resíduos destinados preferencialmente à produção de agregados para a construção civil e na pavimentação de rodovias.

No Brasil, a produção nacional anual de isoladores elétricos de porcelana é estimada em 30.000 toneladas, sendo a cidade de Pedreira, na região Metropolitana de Campinas – SP, a maior produtora. Deste montante, ao redor de 75% da produção refere-se à substituição dos isoladores inservíveis e/ou obsoletos, e então se estima que 22.500 toneladas/ano de isoladores de porcelana se tornem resíduos (CAMPOS *et al.*, 2013).

Nos últimos anos, os resíduos cerâmicos tem despertado interesse em estudos visando seu reaproveitamento devido ao volume gerado e à potencial utilização como fonte de matéria-prima, permitindo reduzir a utilização de agregados convencionais.

Ay *et al.* (2000) avaliaram a adição de resíduos de telhas cerâmicas moídas (tamanho 200 μm), no teor em peso de até 35%, na fabricação de cimento e concluíram que o material apresentava características pozolânicas e propriedades químicas e físicas semelhantes às do cimento.

Conforme Senthamarai e Manoharan (2005), a utilização do RIP com tamanho médio de 20 mm em substituição a agregados convencionais, numa faixa entre 56 a 63% de agregados, e utilizando diferentes relações água-cimento (0,35, 0,40, 0,50, 0,55 e 0,60), não proporcionou resultados superiores de resistência à compressão simples e em tração em relação ao concreto convencional.

Em outro estudo similar, Brito *et al.* (2005) substituíram os agregados convencionais por resíduos de tijolos cerâmicos de construção civil em diversos teores e verificaram que para todos os teores, tanto a resistência à compressão como a resistência à flexão estática diminuíram à medida que se aumentou o teor de resíduos no concreto.

Portella *et al.* (2006) utilizaram dois tipos de cimento (CP II-F 32 e CP V – ARI-RS) e substituíram parcialmente o agregado artificial até um limite máximo de 80% por resíduos de porcelana (grãos e miúdos). Os autores concluíram que os teores de substituição mais adequados se situaram na faixa de 20% a 50%. Os autores também observaram que os traços com cimento CP V-ARI-RS proporcionaram resistências à compressão mais elevadas quando comparados aos do cimento CPII- F-32.

Lopez *et al.* (2007) concluíram que o uso de pó de cerâmica branca para substituir parcialmente a areia, em teores entre 10 a 50%, não reduziu a resistência à compressão da argamassa. Também não observaram diferença significativa em relação ao concreto convencional.

Em seu estudo sobre resíduo cerâmico moído proveniente da fabricação de concreto celular, Binici (2007) verificou que a resistência mecânica foi superior à do concreto com cerâmica miúda em relação ao concreto convencional.

Guerra *et al.* (2009) estudaram o efeito da utilização de resíduos de cerâmica sanitária como agregados nas propriedades mecânicas do concreto. Os autores concluíram que o resíduo utilizado não apresentou diferença significativa na resistência à tração e que a porcentagem de 5% de adição permitiu a obtenção dos melhores resultados na resistência à compressão dentre os traços de concreto estudados.

Em um estudo similar, Pacheco-Torgal e Jalali (2011) concluíram que a utilização de resíduo cerâmico misto (cerâmica branca e cerâmica vermelha) em substituição parcial de até 20% de cimento em concreto aumentou a durabilidade devido à ação pozolânica apresentada pelo resíduo.

Da mesma forma, Torkittikul e Chaipanich (2010) pesquisaram a utilização de resíduos obtidos em indústrias cerâmicas em substituição de areia fina como agregado e concluíram que o teor de 50% de substituição em peso aumentou em 7,5% os valores de resistência à compressão em relação ao concreto convencional. Na mesma linha de pesquisa, Pacheco-Torgal e Jalali (2010) substituíram o agregado convencional por resíduos cerâmicos vermelhos, na faixa granulométrica de 4,76 e 12,70 mm, e obtiveram resultados de resistência à compressão em torno de 10% superior em relação ao concreto convencional.

Segundo Medina *et al.* (2012), os resíduos de cerâmica branca provenientes de indústrias de louças sanitárias utilizados em substituição dos agregados graúdos convencionais nos teores 15%, 20% e 25%, não apresentaram diferenças significativa nos resultados de resistência à compressão simples quando comparados ao concreto convencional.

Lopez *et al.* (2007) relataram em trabalho sobre o uso de materiais cerâmicos em concreto, que o teor de substituição entre 15% a 25% de agregados miúdos por resíduo de indústria cerâmica permitiu a obtenção de concreto ecoeficiente, sem diferenças estatísticas nos resultados de resistência à compressão.

Vejmelková *et al.* 2012 mencionaram que os resíduos de pisos cerâmicos com tamanho de partículas adequado, com área específica de 336 m²/ kg poderiam ser utilizados como material pozolânico substituindo o cimento em até 10%, sem diminuir significativamente a resistência à compressão.

Em seu estudo com revestimentos cerâmicos, Daniyal e Ahmad (2015) observaram que em um teor de substituição de 30% de agregados miúdos e relação de água-cimento de 0,50, a resistência à compressão foi 5,43% superior em relação ao concreto convencional.

A reutilização da porcelana na produção do clínquer pode possibilitar vantagens econômicas, com a redução no consumo de energia, desde que o tamanho de partículas obtidas permita apresentar o efeito de ação pozolânica. Também possibilita obter vantagens ambientais com a redução das emissões de CO₂ na produção de cimento, na diminuição de ocupação de grandes áreas de destinação e na redução do descarte inadequado de isoladores de porcelana na natureza (ZIMBILI *et al.*, 2014)

Outras vantagens técnicas podem ser observadas, tais como: elevação dos valores das propriedades mecânicas, da resistência à expansão devido à presença de cal livre, resistência ao ataque de sulfatos e de álcalis, resistência à ação da água e ácidos, redução do calor de hidratação e aumento da impermeabilidade, e redução na porosidade do concreto (JUAN *et al.*, 2010).

3.4 Utilização de resíduos de isoladores cerâmicos como agregado e material pozolânico

Um isolador elétrico é um dispositivo utilizado para garantir o isolamento dos fios ou dos cabos energizados com seus pontos de sustentação adjacentes em redes de baixa e alta tensão, sendo de fundamental importância na transmissão de energia à longa distância. Também se exige que um isolador tenha uma capacidade de se opor à passagem de corrente elétrica e que apresente elevada resistência mecânica (SOUZA *et al.*, 2004).

Os isoladores de porcelana são materiais cerâmicos classificados como cerâmica branca, pois possuem um corpo de massa branca (argila) com baixo teor de ferro para não comprometer as funções isoladoras do produto, além de feldspato que é o responsável pela geração da “massa vítrea”. Os isoladores ainda são recobertos por uma camada vítrea de esmalte, e possuem também elevado ponto de fusão, sendo manufaturados a frio na forma plástica, sendo submetidos ao processo de queima até temperatura de 2000 °C. (CAMPOS, 2011; PRETTE, 2013).

De acordo com Santolaia *et al.* (2007), a substituição de 10% de agregado graúdo por RIP proporcionou a obtenção de resultados de resistência à compressão simples e de resistência à tração similares aos do concreto convencional.

Estudos com resíduos de isoladores de porcelana tem despertado interesse de pesquisadores pelo seu potencial de reaproveitamento. Campos (2011) utilizou o RIP britado com característica similar àquela de agregado graúdo (brita 0 e brita 1) e concluiu que para que não houvesse redução na resistência à compressão simples, a faixa ideal de substituição do agregado graúdo convencional estaria situada entre 25% a 50%.

Senthamarai *et al.* (2011) concluíram que os resultados de ensaios de compressão simples do concreto convencional não se diferenciaram em mais que 5% em relação ao concreto com substituição de até 50% dos agregados comuns pelos RIP, ao ser adotado tamanho de partículas de até 20 mm.

Higashiyama *et al.* (2012) estudaram o efeito pozolânico do RIP substituindo parcialmente o cimento em um teor de até 30% e concluíram que tanto para resistência à compressão quanto para a resistência à penetração de íons cloreto, os resultados se mostraram superiores aos da argamassa referência.

Higashiyama *et al.* (2013), em seu estudo de coeficiente de difusão aparente de íons cloreto, compararam a argamassa convencional a uma argamassa com a utilização de resíduos de isoladores elétricos moídos (0,75 mm – 5,0 mm). Os autores concluíram que nas relações de água: cimento (0,4, 0,5 e 0,6) utilizadas, a argamassa com RIP se mostrou mais eficaz em resistir à penetração de íons cloreto e que os resultados de resistência à compressão simples não apresentaram diferenças significativas em relação à argamassa convencional.

Beraldo *et al.* (2013) realizaram estudos em pastas e argamassas com substituição parcial do cimento Portland por RIP. Os resíduos foram coletados durante a etapa de fabricação dos isoladores, sem que os mesmos recebessem a aplicação da camada de impermeabilização (esmalte). Os autores concluíram que a finura e a porcentagem de sílica influenciaram diretamente na atividade pozolânica do resíduo. Considerando os traços estudados, concluíram que a porcentagem ideal de substituição seria de 12,5%, pois houve diferença estatística significativa para os outros traços em relação ao traço convencional. Entretanto, os autores observaram diferença estatisticamente significativa com relação às idades de ruptura (7, 14, 28, 56 e 91 dias), sendo a resistência mecânica mais elevada obtida nas idades mais avançadas, denotando, dessa forma, o comportamento pozolânico do material analisado.

Ferreira *et al.* (2013) pesquisaram a reutilização de RIP em substituição parcial ao cimento Portland, tendo testado os seguintes teores de substituição: 10%; 20%; 30% e 40%. Os autores identificaram que a pasta com teor de até 20% de substituição em pastas e argamassas não apresentou diferença estatística em relação à resistência à compressão simples quando comparada ao traço referência.

Patel *et al.* (2015), em seu estudo com resíduo de pó de porcelana sanitária e pó de mármore industrial, utilizaram o teor de 20% de substituição do cimento, em massa, de tamanho de partícula até 75 µm. Os autores concluíram que os resultados de resistência à compressão simples foram 3% inferiores em relação ao concreto convencional.

3.5 Adições minerais

As adições minerais são quaisquer materiais utilizados como insumos do concreto com objetivo de adicionar ou mesmo substituir parcialmente o cimento. São materiais com propriedades pozolânicas que podem ser adicionados ao concreto em quantidades variáveis em relação à massa de cimento, segundo Carmo e Portella (2008). As adições minerais podem ser classificadas em função da sua composição química e mineralógica:

a) *escória granulada de alto-forno*, pertencente ao grupo dos silicatos vítreos contendo, principalmente, cálcio, magnésio, alumínio e sílica, com tamanhos médios de partículas menores do que 45 μm e finura Blaine de 500 m^2/kg ;

b) *cimentante e pozolânico ou cinzas volantes*, o qual contém alto teor de óxido de cálcio ($\text{CaO} > 10\%$); 10% a 15% da distribuição média do tamanho de partículas maior do que 45 μm e finura Blaine compreendida entre 300 m^2/kg e 400 m^2/kg ;

c) *pozolanas comuns*, normalmente constituídas por cinzas volantes de baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$) e, por materiais naturais, com teores entre 15% e 30% de partículas com diâmetro médio $>45 \mu\text{m}$ e finura Blaine entre 250 m^2/kg e 350 m^2/kg . São, também, silicatos vítreos de alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste, geralmente, de quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita. A maior parte das partículas são esferas sólidas com textura rugosa e diâmetro médio da ordem de 20 μm ;

d) *altamente pozolânicas*, tendo como representantes atuais: sílica ativa, na forma amorfa e com diâmetro médio de partículas entre 0,1 μm e 5,5 μm , cinza de casca de arroz (CCA) produzida por combustão controlada, com diâmetro médio de partículas da ordem de 1,5 μm e superfície específica de 16.800 m^2/kg e metacaulim com superfície específica em torno de 60.000 m^2/kg e com partículas altamente lamelares. Segundo Kurdowski (2014), o filler tem ação física, e é inerte não participando, dessa forma, das reações do cimento. A sua utilização pode ocasionar um aumento da massa específica da mistura, pelo efeito de preenchimento dos vazios (efeito microfíler).

De acordo com Mantuano Netto (2006), os materiais pozolânicos são energeticamente mais econômicos do que o clínquer do cimento Portland, tendo ainda implicações ecológicas, pois contribuem para um melhor aproveitamento dos resíduos industriais poluidores. São materiais silicosos ou silico-aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos,

com propriedades aglomerantes (RODRIGUES, 2010). O termo pozolana era popularmente conhecido nos vilarejos próximos ao Monte Vesúvio na Itália para designar os tufos vulcânicos utilizados nas construções do Império Romano, portanto sua utilização como composto cimentício é bem antiga. (SILVA, 2004; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013).

A atividade pozolânica depende da composição química e mineralógica da argila, da temperatura ótima de queima, do tempo de tratamento térmico e das características finais, tais como a fase amorfa e a superfície específica (BAKOULAS *et al.*, 2008; GONZALEZ, 2009). Isaia *et al.* (2003) ainda acrescentaram o efeito físico associado ao tamanho de partículas presentes na mistura. Quanto maior for a superfície de contato da pozolana com o hidróxido de cálcio, maior será a taxa da reação pozolânica.

A reação pozolânica com o cimento Portland à temperatura ambiente é bastante lenta, e por isso muitos estudos sobre pozolanicidade utilizam o hidróxido de cálcio com temperaturas elevadas para ativar o material pozolânico. Existem alguns métodos para investigar a pozolanicidade de um material os quais são baseados no uso de uma solução de hidróxido de cálcio ou na ativação direta com hidróxido de cálcio em pó (Mc CARTER, 1995).

A reação pozolânica é a reação entre a pozolona e o hidróxido de cálcio e ocorre durante as reações de hidratação do C_2S e C_3S para a formação do $Ca(OH)_2$ (hidróxido de cálcio). A sílica existente na pozolana reage com o hidróxido de cálcio, formando os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que têm menor relação CaO/SiO_2 , (WEBER, 2001, CORDEIRO, 2006; DONATELLO *et al.*, 2010).

De acordo com Weber (2001), essa reação bem como a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência são lentas, sendo dada por:



A ABNT NBR 12653 (2014) classifica as pozolanas em três grupos:

- classe N (origem vulcânica e as artificiais de origem de subprodutos de indústrias);
- classe C (cinzas volantes finamente moídas provenientes de termelétricas) e;
- classe E (outras pozolanas, tais como: cinzas volantes e cinzas de resíduos vegetais).

Dentre outros, Mehta (1987) mencionou algumas vantagens da utilização de pozolanas em concretos com cimento Portland, tais como o aumento da trabalhabilidade do material, aumento da resistência à fissuração devido à redução da reação álcali-agregado, e

maior impermeabilidade e, consequentemente, maior durabilidade. Mas, outros autores tais como Santos (2006), mencionaram que se faz necessário o uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas, como no caso da cinza volante.

Segundo Shekarchi *et al.* (2010) e Pereira *et al.* (2015), uma das formas utilizadas para melhorar a durabilidade do concreto é a utilização de materiais adicionados ao cimento tais como: cinzas volantes, microsilica, escória e, mais recentemente, o metacaulim.

Ao alterar a composição química e a microestrutura do concreto, as pozolanas reduzem a porosidade capilar do sistema de cimento tornando-o menos permeável aos fatores químicos exteriores. Atualmente, as adições minerais mais utilizadas na composição do concreto são a sílica ativa, as cinzas volantes e as cinzas de casca de arroz (CCA) (SANTOS, 2011). As principais vantagens do uso dessas adições são os ganhos de resistência mecânica mesmo quando se diminui a quantidade de cimento na mistura; já na microestrutura, tais adições contribuem para o desenvolvimento de uma matriz mais definida e uma estrutura geral menos porosa, o que permite maior resistência ao ataque de agentes agressivos, melhorando sua condição de durabilidade aliada a uma resistência mecânica mais elevada.

3.5.1 Adições mais utilizadas no mercado

3.5.1.1 Cinza de Casca de arroz

A cinza de casca de arroz foi o material utilizado neste trabalho para comparação com o resíduo de isolador de porcelana (RIP), por ser uma pozolana comercialmente muito utilizada.

A produção de grãos no Brasil, estimada para o período 2014-2015, é de 202,23 milhões de toneladas, sendo o arroz responsável por 12,4 milhões de toneladas (6,13%) em uma área plantada de em torno de 2.330 mil hectares (CONAB, 2015). Segundo Mayer *et al.* (2006), os cálculos de geração de casca de arroz consideram o percentual correspondendo a 22% da massa total do grão. Portanto, para o período mencionado estima-se uma produção de casca de arroz de 2,73 milhões de toneladas. A geração de cinzas é em torno de 20% do peso da casca, ou seja, seriam obtidas 540 mil toneladas, caso toda a casca fosse calcinada.

A cinza de casca de arroz (CCA) é um dos resíduos vegetais de maior atividade pozolânica conhecidos e estudados (DELVASTO *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2011). No entanto, a qualidade da CCA depende da eficiência do processo de queima, do tipo de

equipamento utilizado (céu aberto, fornalha ou leito fluidizado), da temperatura de queima e do tempo de exposição à temperatura (POUEY, 2006).

Na Tabela 2, observa-se que o teor de SiO_2 situa-se na faixa de 74,42% a 97%, conforme diversos autores consultados por Silva (2004).

Tabela 2. Percentagem de SiO_2 encontrada na CCA, segundo vários autores

Autor (ano)	Ano	% SiO_2
Ikpomg, A. A.	1993	82,13
Mehta e Folliard	1995	90,00
Isaia, G. C	1997	78,60
Bui e Sroeven	1997	97,00
Gaya et al.	1999	74,42
Paya et al.	1999	85,70
Anwar et al.	2000	93,25
Paya et al.	2000	89,39
Sensale e Dal Molin	2001	87,20
Moraes et al.	2001	86,50
Rêgo et al.	2002	81,48

Fonte: (SILVA, 2004)

3.5.1.2 Silica Ativa

Sílica ativa é normalmente proveniente do processo de produção das indústrias de ferrosilício e silício metálico. Neste processo, o silício é produzido em grandes fornos elétricos de fusão, do tipo arco-voltaico, onde o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas. Como resultado tem-se a produção do monóxido de silício gasoso (SiO), que se condensa às temperaturas mais baixas, formando o dióxido de silício (SiO_2). O teor de SiO_2 situa-se em torno de 80% a 85% na Noruega e Estados Unidos (maiores produtores) e no Brasil está fixado em 85% (CARMO e PORTELLA, 2008).

3.5.1.3 Metacaulim

O metacaulim é uma pozolana que tem sido obtida por meio da moagem e calcinação de argilas especiais (caulim de alta pureza), em baixas temperaturas, sendo um material com alta atividade pozolânica. Ao contrário de outras pozolanas, o metacaulim não

é um rejeito industrial como ocorre com a sílica ativa, com as escórias siderúrgicas, com as cinzas volantes e outros materiais largamente utilizados no mercado cimenteiro. Acredita-se que haverá um aumento de produção desta pozolana, entretanto a dificuldade de fabricação sempre o tornará um produto escasso e nobre, recomendado somente em aplicações especiais (ROCHA, 2005).

Com relação ao aspecto químico este material apresenta, geralmente, teores semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3 , em massa, de aproximadamente, 40% a 55% e 40% a 45%, respectivamente. Este material segue algumas exigências químicas, estabelecidas em normas como NBR 12.653 (2014) e *American Society for Testing and Materials* - ASTM 618 C (2015), mesmo não se tendo normas específicas (POON *et al.*, 2001; CARMO e PORTELLA, 2008).

Segundo Abbas *et al.* (2010), os ganhos de resistência à compressão e em flexão são mais rápidos nas primeiras idades em relação ao concreto convencional, além de melhorar a resistência à corrosão da armadura metálica.

3.6 Caracterização dos materiais

Para a avaliação da pozolanicidade de materiais, faz-se necessário a aplicação de ensaios físicos, químicos e mecânicos. A utilização de pozolanas em matrizes cimentícias contribui para o desenvolvimento da resistência mecânica como resultado da combinação de efeitos físicos e químicos. Os efeitos químicos estão relacionados com a hidratação normal dos compostos do cimento Portland e com a reação pozolânica do material, que ocorre entre o hidróxido de cálcio e a água. Por outro lado, os efeitos mecânicos estão associados ao empacotamento ocorrente nas misturas o qual depende do tamanho das partículas da pozolana (SATA *et al.*, 2012).

Donatello *et al.* (2010) mencionaram que, em geral, os métodos para avaliar as pozolanas podem ser classificados como métodos indiretos e diretos. Nos primeiros se monitora indiretamente a cal que não reagiu durante a reação pozolânica em relação ao tempo de reação, como por exemplo, o ensaio Frattini (EM 196-5). Existem também outros métodos indiretos que se baseiam no comportamento de resistência à compressão à medida que ocorre a reação. Os métodos diretos, por sua vez, são baseados na medição da quantidade de portlandita que reagiu (termogravimetria – TG e difração de Raios – X - DRX).

3.6.1 Classificação Ambiental – NBR10.004 (2004)

A classificação de um resíduo compõe uma das primeiras etapas do processo de caracterização do mesmo. Essa caracterização pode apresentar um enfoque ambiental e/ou químico. Nos Estados Unidos, pode-se citar o *EPA Test Method* 1312 (1994) que determina a extração de componentes orgânicos e inorgânicos de sólidos, líquidos e resíduos. Essa norma é controlada pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA) responsável por desenvolver a legislação sobre assuntos de Meio Ambiente.

No Brasil, a norma utilizada como referência é a ABNT NBR 10.004 (2004). Essa norma determina que a classificação de resíduos sólidos envolva a identificação dos processos que lhes deram origem, as características de seus componentes químicos, e a comparação destes componentes com listagens de resíduos e substâncias encontrados nos anexos dessas normas, cujo impacto à saúde e ao meio ambiente seja conhecido.

Conforme recomendado pela ABNT NBR 10.004 (2004), todo resíduo deve ser caracterizado e classificado como:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: que trazem perigo à saúde pública e risco ao meio ambiente.
- b) Resíduos classe II – Não perigosos:
 - Resíduos classe II A – Não inertes. Tem propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 - Resíduos classe II B – Inertes. Quaisquer resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Para determinação se um resíduo é Classe I - Perigoso ou Classe II - Não Perigoso utiliza-se a ABNT NBR 10.005(2004) que fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Para determinação se o resíduo é Classe IIA- inerte ou Classe IIB- não inerte utiliza-se a ABNT NBR10.006 (2004) que fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

3.6.2 Fluorescência de Raios - X – FRX

Para identificação dos elementos químicos presentes em uma amostra deve-se utilizar uma técnica de ensaio não destrutiva e que permita efetuar uma análise quantitativa apresentando a proporção de cada elemento em uma amostra. Trata-se da espectrometria de fluorescência de Raios - X, na qual uma fonte de Raios - X é aplicada na superfície da amostra e, em seguida, pode-se efetuar a análise dos Raios - X fluorescentes emitidos. O uso dessa técnica se faz necessário para conhecer a composição química de materiais que serão utilizados como adições minerais.

O teor de carbono é importante e deve ser controlado, pois o mesmo não participa das reações de hidratação; portanto, quanto mais elevado for o teor de carbono, menor será a quantidade real de pozolana disponível para a reação (JOHN *et al.*, 2013).

A perda ao fogo (PF) pode ser determinada por dois métodos: a termogravimetria (TG), que relaciona a temperatura com a perda de massa ao longo do tempo; o outro método utilizado é aquele prescrito pela ABNT NBR NM 18 (2012).

Patel *et al.* (2015), em seu estudo com resíduo de pó de porcelana sanitária (louças) com objetivo de substituir parcialmente o cimento, relataram que a análise de FRX apresentou um resultado de perda ao fogo de 0,48% da composição, sendo inferior aos limites ($\leq 10\%$) estabelecidos pela norma ASTM 618C.

Higashiyama *et al.* (2013), em seu estudo de RIP moído (0,075 a 5,000 mm) em substituição ao cimento, em argamassa convencional, verificaram que a somatória dos óxidos encontrada foi de 92,81% e a perda ao fogo ($>0,01$), atendendo os valores mínimos da somatória de óxidos (70%) estabelecidos pelas normas ASTM 618C, ABNT 12.653 e IS 1344.

Segundo a ASTM C-618 (2012), para que um material seja considerado pozolana deve apresentar, no mínimo, 70% da somatória dos óxidos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e, no máximo, 5% de SO_3 ; o teor máximo de álcalis disponíveis em Na_2O deve ser de 1,5%. Para esse cálculo adota-se a Equação 2.

$$\text{Álcalis equivalente em } \text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + 0,64 \text{ K}_2\text{O} \quad \text{Equação (2)}$$

3.6.3 Difração de Raios - X – DRX

Por meio de DRX são identificadas as fases cristalinas do material, identificando fases anidras presentes na pasta de cimento, e na sequência, permitindo identificar o desaparecimento das fases anidras e o aparecimento das fases hidratadas do cimento (QUARCIONI, 2008).

A difração de Raios - X pelos cristais resulta de um processo em que os Raios - X são dispersos por elétrons dos átomos sem mudança de comprimento de onda (dispersão coerente ou de Bragg). As medidas são realizadas incidindo-se os Raios - X sobre a amostra, sendo estes refratados e captados por detector, ou seja, a amostra é rotacionada e o detector (entre os ângulos θ e 2θ) forma um gráfico com máximos de picos ou interferências com os valores de 2θ máximos (LYRA, 2010).

Vidican *et al.* (2008) utilizaram a técnica de difração de Raios - X para identificar as fases de sulfato de cálcio em pasta de cimento, pois todas são cristalinas e difratam nos ângulos conhecidos.

3.6.4 Avaliação de pozolanicidade por condutividade elétrica

A técnica de avaliar pozolanas por meio de ensaio de condutividade elétrica foi desenvolvida primeiramente por Rassk and Bhaskar, em 1975 (VILLAR-COCINHA, 2005). É uma técnica que vêm sendo muito utilizada por pesquisadores, com a vantagem de serem obtidos resultados em um tempo menor, quando comparados com demais ensaios.

Luxán *et al.* (1989) propuseram um método fácil para avaliar de forma indireta a atividade pozolânica das pozolanas naturais. O método é baseado na medida da condutividade elétrica da suspensão hidróxido de cálcio/pozolana. Os autores estabeleceram um índice obtido pela variação entre a condutividade elétrica final e a inicial, para um período de tempo de apenas 120 s.

Da mesma forma, Payá *et al.* (2001) propuseram um método rápido, baseado no método de Luxán, para avaliar o comportamento da cinza volante em uma solução de hidróxido de cálcio para diversos tempos de reação (100, 1000 e 10000 s). Os autores utilizaram uma solução insaturada de hidróxido de cálcio, em uma concentração de 800 mg de Ca(OH)_2 por litro de água deionizada e temperatura de 80 °C, para aumentar a taxa de dissolução do Ca(OH)_2 . Ao colocar a cinza volante no sistema, realizaram medições em sistemas com temperaturas de 40 °C, 60 °C e 80 °C. Uma perda relativa de condutividade foi estabelecida, para a comparação dos dados, e

a determinação desse parâmetro para intervalos de tempo de 100 s, 1000 s e 10000 s foi proposta para avaliar a atividade pozolânica dos materiais avaliados.

3.6.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e Espectroscopia de Raios - X por dispersão de Energia - EDS

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um instrumento muito versátil e usado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos, além de ser simples a preparação das amostras. No MEV, os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários varre a amostra esses sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução; por sua vez, os elétrons retroespalhados fornecem imagens características da variação de composição (PINHEIRO, 2008).

Então, na microscopia eletrônica de varredura tem-se apenas uma análise visual do material. Com o complemento da espectroscopia por dispersão de energia (EDS) tem-se uma análise mais completa por meio da identificação dos elementos químicos presentes na amostra. No EDS, um microanalisador acoplado ao MEV utiliza um feixe de elétrons focalizados para interagir com os átomos da amostra. Os elétrons são detectados por um equipamento que os converte em uma imagem microscópica. Cada elemento atômico emite um feixe de raios - X com intensidade diferente, permitindo assim a identificação dos elementos presentes na amostra (ROCHA, 2005).

3.6.6 Superfície Específica - BET

O método BET (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller) baseia-se na adsorção de moléculas de um gás inerte na superfície externa e interna dos poros abertos e interligados das partículas do sólido ensaiado. É amplamente utilizado para determinar a superfície específica de materiais sólidos com diferentes tamanhos de poros (ROCHA e PERES, 2009). O equipamento realiza medidas de área superficial específica pela determinação do volume de gás fixado na superfície da amostra. A análise é realizada adicionando, em etapas, quantidades conhecidas de nitrogênio ao recipiente da amostra, de forma que diferentes pressões de vapor sejam alcançadas. Durante o procedimento, um

sensor monitora as variações de pressão, e quando a pressão de saturação é alcançada, a amostra é removida da atmosfera de nitrogênio, e aquecida para que ocorra a dessorção e quantificação das moléculas de nitrogênio adsorvidas no material (GOBBI, 2014).

A demanda de água de uma mistura está relacionada com a superfície específica e com a densidade de empacotamento das partículas: quanto maior for a área superficial, menor será a densidade de empacotamento e maior será a demanda de água. (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). Na pasta fresca, a água pode ser dividida em duas partes: uma é a água de preenchimento, que preenche os espaços vazios entre as partículas e está relacionada com a densidade de empacotamento; a outra é a água presente na camada de superfície, que forma uma película na superfície da partícula, sendo responsável pela fluidez da pasta e está relacionada com a superfície específica do sistema. Um material pozolânico muito fino, e consequentemente, com superfície específica mais elevada do que a do cimento, como é o caso da microsílica, aumenta a quantidade de água superficial, diminuindo a quantidade de água de preenchimento, mas não altera a quantidade total de água no sistema (ZHANG *et al.*, 1996). Assim, mantendo-se a área superficial constante, quanto mais estreita for a distribuição granulométrica das partículas, maior será a demanda de água para se obter uma mistura com trabalhabilidade adequada.

3.7 Caracterização físico-química e mecânica da pasta

O grau de hidratação em um sistema à base de cimento sofre influência da forma segundo qual é realizada a distribuição das partículas, pois se verifica que uma distribuição contínua de partículas é desejável para o estado de empacotamento, com objetivo de aproximar as partículas, enquanto uma distribuição heterogênea (maior distância entre as partículas) é mais adequada para a taxa de hidratação. Assim, os dois efeitos são exatamente opostos; porém, para as propriedades dos materiais, eles devem ser considerados simultaneamente: por um lado, uma maior densidade de empacotamento é necessária, enquanto que, por outro lado, um maior grau de hidratação é desejável. Quando a relação água/cimento é mantida constante, a área superficial aumenta com o aumento da densidade de empacotamento. Dessa forma, pode-se afirmar que a área superficial pode aumentar sem acréscimo da demanda de água por meio de ajuste na distribuição granulométrica das partículas (CASTRO *et al.*, 2009).

Alguns estudos aplicados ao RIP avaliaram o efeito da relação água: cimento nas propriedades de pasta de cimento. Senthamarai e Manoharan (2005) utilizaram RIP com

tamanho médio de 20 mm em substituição aos agregados convencionais, utilizando diferentes relações água-cimento (0,35, 0,40, 0,50, 0,55 e 0,60).

Da mesma forma, Torkittikul e Chaipanich (2010) pesquisaram a utilização de resíduos obtidos em indústrias cerâmicas em substituição à areia miúda, em argamassa e concluíram que o teor ideal de substituição seria de 50%, com relação água-cimento de 0,5.

Higashiyama *et al.* (2012), estudaram o efeito pozolânico do RIP substituindo parcialmente o cimento em um teor de até 30%, e utilizaram a relação de água: cimento de 0,5.

Higashiyama *et al.* (2013), em seu estudo de comparação de argamassa convencional com outra com a com utilização de RIP moído, utilizaram relações de água: cimento de: 0,4, 0,5 e 0,6.

Beraldo *et al.* (2013) realizaram estudos em pastas e argamassas com substituição parcial do cimento Portland por RIP e fixaram a relação de água: cimento de 0,50 para os traços com os teores de substituição 10%, 20%, 30% e 40%.

3.7.1 Termogravimetria

A termogravimetria (TG) é uma técnica que permite registrar continuamente a variação de massa de uma amostra que é colocada em uma atmosfera controlada, em função da temperatura, ou do tempo, enquanto esta é submetida a uma programação controlada de variação de temperatura (RODRIGUES, 2010). A representação da massa em função do tempo se denomina termograma ou curva de decomposição térmica (DTG). A curva DTG é a representação gráfica da derivada da curva TG e indica a velocidade da perda de massa de um determinado material com a temperatura ou com o tempo.

Normalmente, a termogravimetria (TG) tem sido utilizada para avaliar a atividade de materiais pozolânico em misturas com cimento para períodos longos de hidratação (CHEREM DA CUNHA *et al.*, 2008).

Bakoulas *et al.* (2008), em seu estudo com pó cerâmico em pasta de cimento utilizaram a técnica de TG para a identificação dos compostos formados durante a reação pozolânica.

3.7.2 Curva de hidratação

Em um teste em calorímetro adiabático, o calor de hidratação é medido pelo monitoramento do fluxo de calor da amostra, enquanto esta é mantida sobre uma condição de isolamento térmico ideal com perda mínima de calor para o ambiente. Trata-se de um teste confiável, embora demorado, necessitando de equipamento de custo elevado (IBRACON, 2008). Já em um teste com um calorímetro semi-adiabático, os resultados são mais fáceis de serem interpretados, e a duração do teste se mostra mais rápida, e apresenta certa confiabilidade. Para ambos os métodos deve dispor-se de acessórios que permitam o registro de temperatura ao longo do tempo (COST, 2008; TAYLOR, 2008).

O processo completo da hidratação e pega do cimento resulta de uma combinação das reações que se desenvolvem na solução, dos fenômenos interfaciais e das reações no estado sólido. Para a visualização da influência dos aditivos sobre a hidratação do cimento, um esquema representando a evolução da hidratação do cimento ao longo do tempo é apresentado na Figura 3, onde são identificados cinco estágios distintos da hidratação: I - Reação inicial (pré-indução), entre 0 e 15 min; II - Período de indução, entre 15 min e 4 h; III - Período de aceleração, entre 4 e 8 h; IV - Período de desaceleração e endurecimento, entre 8 e 24 h; V - Período de reação lenta e contínua (difusão), entre 1 e 28 dias (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

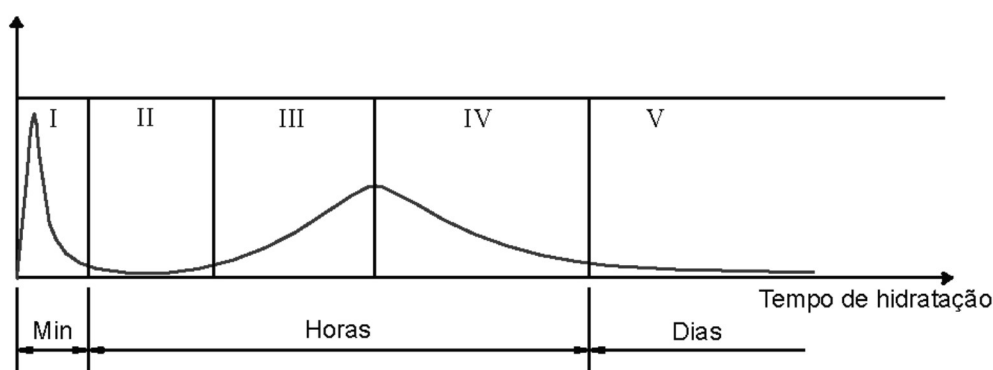


Figura 3. Adaptação de uma representação gráfica da hidratação do cimento pelo método da calorimetria.

Fonte: Castro e Pandolfelli (2009).

3.7.3 Tempo de pega

O tempo de início de pega está associado ao limite de manuseio da mistura, enquanto que o tempo de fim de pega se refere ao início do processo de resistência mecânica. Ambos são pontos definidos arbitrariamente (referência) por meio do método de resistência à penetração. Na pasta de cimento, os ensaios são realizados pelo aparelho de Vicat, que mede a resistência à penetração de uma agulha em uma mistura de consistência padrão (SOUZA, 2007). O início de pega é o tempo decorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha interrompa a sua penetração a 4 ± 1 mm do fundo do molde. O fim de pega é atingido quando a agulha faz uma impressão na superfície da pasta, correspondente a 0,5 mm, conforme recomendado pela NBR NM 65 (2003).

Segundo CASTRO e PANDOLFELLI, 2009, o que pode influenciar no tempo de pega é a relação água/cimento, temperatura inicial e de cura, dos teores de álcalis solúveis e de aditivos químicos, a dosagem, a natureza e o tipo de adição mineral.

3.7.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosidade do concreto é definida como sendo a proporção de volume vazio em relação ao seu volume total, o qual, juntamente com o tamanho dos poros, depende na composição do concreto e de características de sua produção (AHMAD e AZAD, 2013).

O ensaio de porosimetria de intrusão de mercúrio é uma técnica quantitativa utilizada na avaliação da porosidade de materiais sólidos, sendo possível determinar o tamanho médio e o volume total dos poros (RODRIGUES, 2010; WU, 2014).

Nesta técnica, a amostra é seca para retirar dos poros qualquer água ou fluido existente. Após a pesagem a amostra é transferida para a câmara no penetrômetro, onde é feito vácuo e o mercúrio é introduzido, envolvendo a amostra. O mercúrio não percola espontaneamente para dentro dos poros vazios, a menos que uma pressão seja aplicada. Então, a pressão de mercúrio é aumentada continuamente e a intrusão é então monitorada (DIAMOND, 2000).

Os resultados do ensaio são apresentados na forma de gráficos em que aparecem os volumes de mercúrio introduzidos em função do diâmetro de poro. A faixa de poros avaliada por este método depende da pressão de intrusão do mercúrio. A porosidade alcançada pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio não é uma medida total de porosidade do sistema, pois os poros finos (poros do gel hidratado) existentes em pastas de cimento

requerem pressão mais elevada do que a capacidade dos instrumentos comerciais para serem penetrados (SANTOS, 2006).

Chatterji (2001) e Wu (2014) relataram que apesar de ser um método muito utilizado, a porosimetria de intrusão de mercúrio não é ainda o método mais adequado, pois se sabe que uma pasta de cimento sofre uma contração irreversível durante a etapa de secagem do método de ensaio e, conseqüentemente, ocorre alteração na estrutura dos poros.

3.7.5 Ultrassom

A utilização do ensaio não destrutivo (END) através de ultrassom na inspeção e avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concretos tem sido, nos últimos anos, muito estudado tanto no meio acadêmico quanto no científico (SANTOS, 2008).

A vantagem do método não destrutivo por ultrassom reside no fato de que o mesmo oferece uma avaliação da evolução direta da qualidade do material, rapidez na execução do ensaio, determinação da sua homogeneidade, detecção da presença de fissuras e vazios. Esta evolução é acompanhada através da medida da velocidade de propagação do som, no concreto, desde as fases iniciais (pega), até idades mais avançadas (endurecimento), para o mesmo material (ZUCCO, 1999; PIMENTEL, 2004; SANTOS, 2008; TORALLES-CARBONARI, 2010).

Segundo Beraldo (1994), o equipamento de ultrassom emite um impulso de vibração longitudinal, produzido por um transdutor eletroacústico que deve ser mantido em contato com o material. O impulso vibratório é, então, captado por outro transdutor, que também é mantido em contato com o material, sendo convertido em sinal elétrico e em unidades de tempo. Este tempo de propagação do som no material (e a conseqüente velocidade) pode caracterizar o material, servindo de parâmetro para avaliação das suas propriedades mecânicas.

3.7.6 Avaliação mecânica

Em uma pasta de cimento Portland, as reações pozolânicas e, conseqüentemente o ganho de resistência mecânica associada, parecem ocorrer após sete dias de hidratação. Em seu estudo, Mehta (1987) afirmou que no período de hidratação de 7 a 28 dias, os efeitos na resistência resultantes da reação pozolânica não foram consideráveis e que para idades iniciais de hidratação do concreto, as misturas contendo pozolanas apresentam resistências

inferiores à mistura de referência. Mas, as resistências finais, em idades mais avançadas, podem ser superiores às de referência, dependendo da qualidade e quantidade de pozolana utilizada (MANTUANO NETTO, 2006). Aparentemente um excesso de pozolana (por exemplo, superior a 30%, em peso em misturas de cimento) deve ser evitado, nos casos em que uma redução substancial na resistência mecânica do produto possa não ser tolerada, especialmente em concretos com pouca idade, ou em condições de baixas temperaturas (MEHTA, 1987).

As adições minerais contribuem para o refinamento da estrutura dos poros (efeito físico) associado à reação pozolânica (efeito químico). Este efeito físico é conhecido “efeito filer”, tornando a estrutura mais densa, menos permeável e, conseqüentemente, mais resistente. Isto se deve à reação com o Ca(OH)_2 , produto da hidratação do cimento, e com água, formando o gel C-S-H (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009; BARROSO, 2013).

De acordo com Nakanishi (2013), o uso de uma pozolana em uma matriz cimentícia contribui para a resistência mecânica do material devido à combinação de fatores químicos (hidratação do cimento e atividades pozolânicas do material) e físicos (finura do material e empacotamento das partículas). Pode-se medir diretamente esse comportamento por meio do ensaio de resistência à compressão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI Estrutura), da marca Cauê, cujas características atendem às especificações da ABNT NBR 5733 (1991). A pureza e a granulometria desse cimento Portland comercial justificam o seu uso neste trabalho, pois o mesmo não contém adições minerais, que poderiam interferir na análise do comportamento do RIP. Esse tipo de cimento apresenta teores mais elevados de C_3S (silicato tricálcico- $3CaO.SiO_2$) e C_2S (silicato dicálcico- $2CaO.SiO_2$), o que faz com que seja aumentada a sua reatividade.

Na Figura 4, apresenta-se um difratograma de Raios - X (DRX) do cimento CPV-ARI, que foi utilizado nos ensaios com as pastas. Os compostos identificados pelo DRX foram os mesmos encontrados por Medina (2011) em seu estudo.

O DRX foi realizado no Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC), na Faculdade de Engenharia Química-Unicamp.

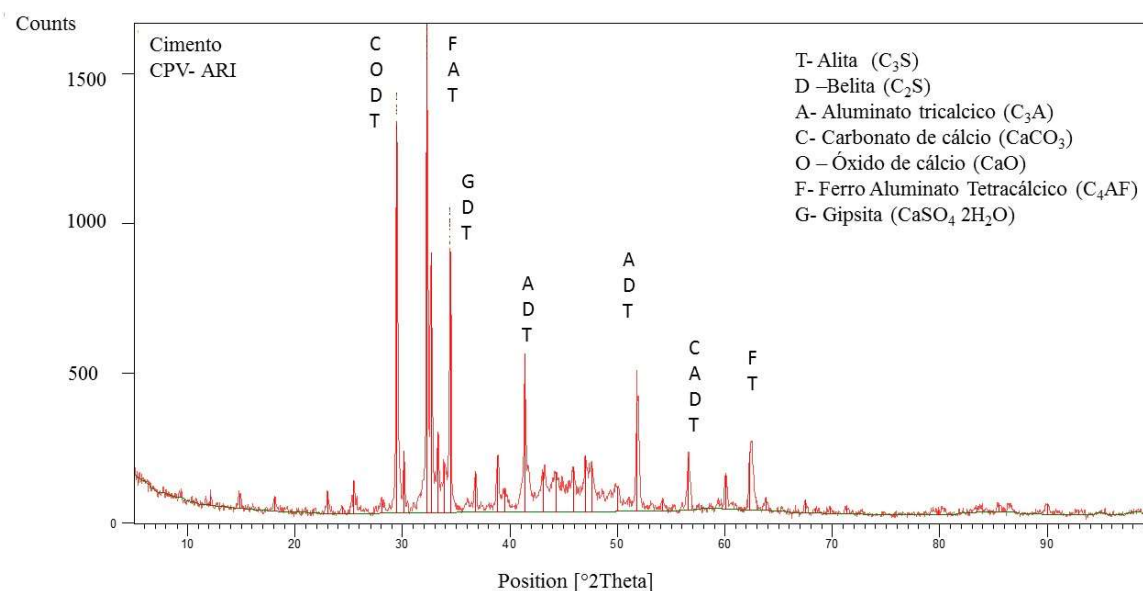


Figura 4. DRX do cimento CPV-ARI.

4.1.2 Hidróxido de cálcio

Para o ensaio de condutividade elétrica (seção 4.2.1.4), e na preparação de pastas avaliadas no ensaio de termogravimetria (seção 4.2.3.3), foi utilizado o hidróxido de cálcio (CH) da marca *Synth*, com teor mínimo de pureza de 95%. A grande vantagem de utilizar esse material na produção das pastas é que seu teor de CH disponível é mais elevado quando comparado com pastas de cimento Portland, o que teoricamente favoreceria a sua reação com o RIP.

4.1.3 Resíduos de isoladores de porcelana (RIP)

No presente trabalho, o RIP foi obtido de uma empresa terceirizada, situada em Rio Claro- SP, responsável pela coleta de todo volume de resíduos gerados nas Estações de Avançadas – EA's do grupo CPFL. Na Figura 5, apresenta-se o container de recepção do RIP.



Figura 5. Container para disposição dos isoladores cerâmicos na EA's

4.1.4 Processo de Fragmentação

O RIP foi beneficiado em uma empresa de prestação de serviços de moagem, a New Tech, situada em Rio Claro - SP. O processo de fragmentação do RIP consistiu no recebimento de 600 kg de resíduos de isoladores inservíveis em *big-bags*, conforme, Figura 6. Esta quantidade foi suficiente para o preenchimento do volume do moinho-de-bolas, sendo que o resíduo deveria se encontrar isentos de possíveis materiais contaminantes tais como suportes metálicos, parafusos, resíduos de enxofre, dentre outros. No entanto, na sequência do trabalho constatou-se que o RIP poderia estar contaminado com chumbo, conforme encontra-se detalhado no item 5.1.3.



Figura 6. Resíduos de isoladores de porcelana inservíveis.

Os resíduos de isoladores de porcelana passaram por duas etapas de fragmentação: britagem (primária e secundária) e moagem. No planejamento do processo, realizado em conjunto com o prestador de serviços, avaliou-se que se fosse adotado tal procedimento o tempo de processo seria menor, além de possibilitar a redução no custo de processamento do resíduo.

Na britagem primária, o RIP foi posicionado próximo ao britador-de-mandíbulas e alimentado manualmente (Figura 7a). A seguir, o material fragmentado seguiu por uma esteira até o britador-de-martelos (Figura 7b), para ser efetuada então a britagem secundária. Os parâmetros de processo da britagem primária estão apresentados na Tabela 3. Após os dois processos de britagem, o material se encontrava conforme se observa na Figura 8. Observou-se, nesse processo, uma grande geração de material que fica em suspensão, sendo

todo o resíduo britado acondicionado novamente em *big-bags*, os quais foram, posteriormente, transferidos para o setor de moagem para fragmentação final em um moinho-de-bolas (Figura 9a).



Figura 7. Moinho-de-mandíbulas (a) e Moinho-de-martelos (b).



Figura 8. Material moído.

Nesta segunda etapa da moagem, o material processado no moinho-de-bolas foi finamente moído, por um período de 16 h contínuas, tendo sido utilizados os parâmetros de processo descritos na Tabela 3. Os parâmetros de processo de fragmentação utilizados para o isolador foram similares aos dos materiais cerâmicos já processados pela empresa. As amostras foram retiradas de uma em uma hora até ser obtido um índice de retenção de 5% em malha 325 *mesh* (45 μm), conforme Figura 9b.

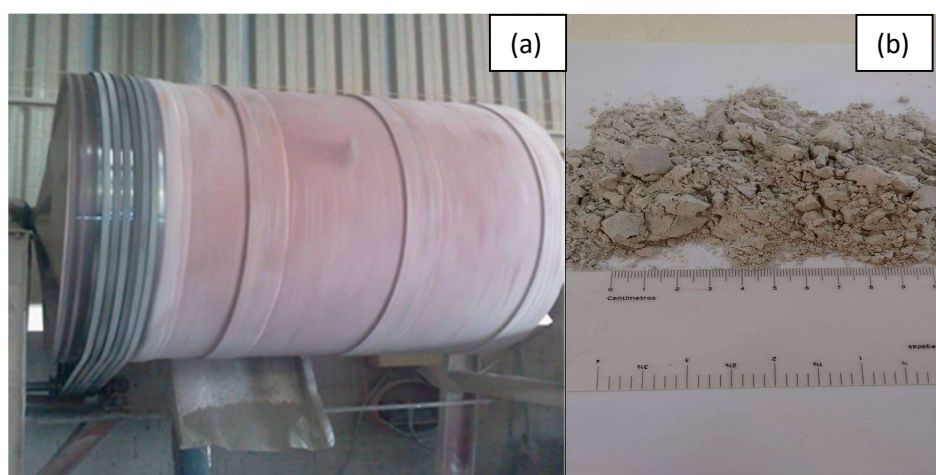


Figura 9. Moinho-de-bolas (a) e material moído.

Tabela 3. Dados do processo de fragmentação.

Fragmentação - Britagem Primária e Secundária		Fragmentação - Moagem	
Potência do motor - Moinho de mandíbulas	15 CV	Potência do motor - Moinho de bolas	20 CV
Tempo de processo	10 min	Tempo de processo	16 h
Mandíbulas de martelos	15 CV	Volume de ocupação com bolas cerâmicas	60-70%
Tempo de processo	10 min		

4.1.5 Cinza de casca de arroz (CCA)

No presente trabalho, a cinza de casca de arroz (CCA), de marca Nobre, foi obtida na empresa GEEA – Geradora de Energia Elétrica de Alegrete, situada em Alegrete - RS. A CCA utilizada é um produto comercializado no mercado, sendo consumida principalmente por empresas concreteiras. Por ser um produto cujas características têm sido intensamente estudadas, a CCA foi utilizada apenas como material comparativo com o RIP.

4.2 Metodologia

Com o objetivo de auxiliar na avaliação do RIP como material pozzolânico foi utilizado um produto comercial, a CCA, para os ensaios químicos de FRX, DRX, condutividade elétrica, MEV, superfície específica e massa específica.

Uma vez comprovada sua atividade pozzolânica, a próxima etapa foi compará-lo com o cimento CPV-ARI, através da granulometria a laser, quanto à distribuição do tamanho de partículas. Foi utilizado o cimento CPV-ARI em vez da CCA com o objetivo de avaliar o efeito da distribuição de partículas conseguida pelo processo de fragmentação nas pastas cimentícias. Na Figura 10, apresenta-se o delineamento experimental dos ensaios.

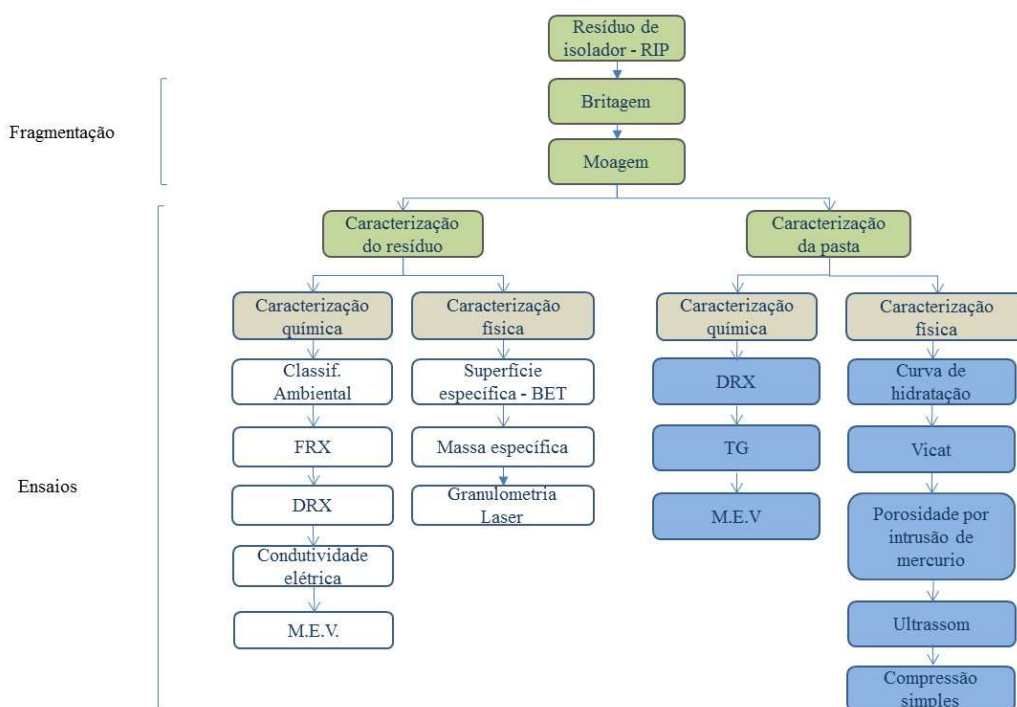


Figura 10. Fluxograma das etapas de caracterização química e física.

4.2.1.1 Fluorescência de Raios - X (FRX) e perda ao fogo (PF)

A composição química das amostras de RIP e de CCA comercial foram obtidas por meio de análise de fluorescência de Raios - X semiquantitativa, com elementos químicos de flúor a urânio, em um espectrômetro por fluorescência de Raios - X *Axios Advanced*, marca PANalytical. A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT),

da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP-USP). Foi utilizada a norma NBR NM 18 (2012), para avaliação de perda ao fogo do RIP e da CCA comercial.

4.2.1.2 Difração de Raios – X (DRX)

As análises de difração de Raios - X para amostras em pó de RIP e de CCA foram preparadas e colocadas no porta-amostras (Figura 11a), sendo a análise realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de Raios-X, marca Philips, modelo MPD 1880 (Figura 11 b).

Os dados foram obtidos à temperatura ambiente utilizando-se os seguintes parâmetros: voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, em um intervalo 2theta de 5 - 100 °C com um passo de 0,05 °C e velocidade de 0,0166 °C /s. As fases cristalinas foram obtidas por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - *International Centre for Diffraction Data* (2003) e PAN-ICSD – *PANalytical Inorganic Crystal Structure Database* (2007).

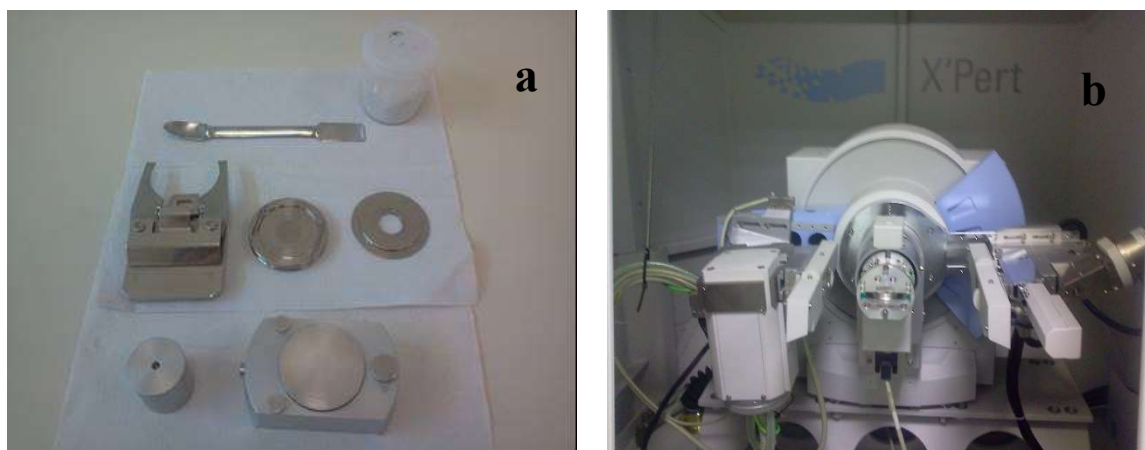


Figura 11. (a) Preparação da amostra.

(b) Equipamento de DRX – Philips.

4.2.1.3 Caracterização ambiental do RIP

O ensaio de caracterização ambiental foi realizado na empresa TASQA – Serviços Analíticos, situada na cidade de Paulínia - SP, conforme a ABNT NBR 10.004/ 2004. O

objetivo deste ensaio é o de classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Foram preparados 2 kg de RIP moído para realização dos ensaios de extratos lixiviado (ABNT NBR 10.005/ 2004) e solubilizado (ABNT NBR 10.006/ 2004). No primeiro, o processo consiste em determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator (ácido acético glacial, ácido clorídrico e água). Para resíduos contendo teor de sólidos igual a 100%, foram pesadas 100 g de amostra que passaram em uma peneira de malha de 9,5 mm. A amostra foi transferida para um frasco de lixiviação contendo uma quantidade de solução de extração na proporção de 20:1 com agitação de (30 ± 2) rpm durante (18 ± 2) h à temperatura de 25 °C. O filtrado obtido é denominado de extrato lixiviado.

No segundo, o ensaio consiste em obter um extrato solubilizado (filtrado) de resíduos sólidos. Para o procedimento, foram utilizados 250 g (base seca) do resíduo que havia passado em uma peneira de malha de 9,5 mm, colocando-se em um frasco e adicionando-se 1000 mL de água deionizada. O frasco foi coberto e deixado em repouso por 7 dias, em temperatura de até 25 °C. O filtrado obtido é denominado de extrato solubilizado, visando diferenciar os resíduos classificados na ABNT NBR 10.004 (2004) como classe II A - não inertes – e classe II B – inertes.

4.2.1.4 Avaliação da pozolanicidade do RIP por condutividade elétrica

O ensaio de pozolanicidade é um ensaio que visa à obtenção do índice de atividade pozolânica (IAP) de uma adição mineral ou de um material pozolânico, por meio da medida da condutividade elétrica em uma solução de hidróxido de cálcio (RODRIGUES, 2012). O ensaio foi realizado no Laboratório de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e de Engenharia de Alimentos (FZEA-USP), situado em Pirassununga – SP.

A medição da condutividade elétrica foi realizada em duas soluções:

- 1) RIP e água deionizada: adotou-se os procedimentos a, f, g, h, descritos a seguir.
Esse procedimento teve como objetivo avaliar a contribuição da condutividade elétrica total dos íons Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e de outros íons que porventura pudessem estar presentes no isolador, mesmo que ocorressem em baixa concentração;
- 2) Solução com o hidróxido de cálcio, água deionizada e RIP: seguindo os procedimentos a, b, c, d, e, f, g, h, descritos a seguir.

As medições de condutividade elétrica de solução CH/RIP seguiram as orientações de Payá *et al.* (2001), adotando-se as seguintes etapas:

- Colocou-se 250 mL de água deionizada em um balão de fundo chato de três bocas paralelas;
- A temperatura da água foi elevada a 80 °C (agitador magnético com aquecimento, modelo RCT Basic, da Ika e com controlador digital de temperatura, modelo ETS-D5, Ika);
- Ao atingir a temperatura de 80 °C, adicionou-se 200 mg de Ca(OH)_2 para se obter uma solução insaturada de CH;
- O tempo do processo de agitação foi de 1 h, garantindo que todo CH fosse dissolvido;
- Após 1 h, efetuou-se a mudança da temperatura da solução para 60 °C, durante as primeiras horas de hidratação;
- Ao atingir a temperatura de 60 °C iniciou-se a coleta de valores de condutividade elétrica por meio de um condutivímetro elétrico, modelo DM-32, da Digimed, com um programa de coleta de dados, desenvolvido pela Digimed e a célula de condutividade de aço inox, modelo DMC-001 XTX, da Digimed, com leitura de 0,001 $\mu\text{S/cm}$ a 20000 $\mu\text{S/cm}$ (Figura 12).
- A seguir adicionou-se 5,25 g de RIP na solução CH/água;
- As informações foram coletadas durante 24 h.



Figura 12 – Equipamentos utilizados para medir a condutividade elétrica do sistema CH/RIP.

Após coleta dos dados, foi calculada a perda em condutividade da solução que por meio das curvas de condutividade dos dois sistemas da solução CH/ RIP e CH/ água relação ao tempo. Em seguida, calcula-se a perda relativa segundo a Equação 3:

$$(\%PR)_t = \frac{C_o - (C_{pa})_t}{C_o} 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

C_o é o valor de condutividade elétrica da solução insaturada de CH antes da adição da pozolana (RIP) ;

C_{pa} é a perda absoluta em condutividade para um dado tempo t (em s).

Após os cálculos foram traçadas curvas de perda relativa em condutividade elétrica (PR%) *versus* tempo e obtiveram-se os valores de PR para os períodos de 100 s $(\%PR)_{100}$, 1000 s $(\%PR)_{1000}$ e 10000 s $(\%PR)_{10000}$.

4.2.1.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de Raios - X por dispersão de energia (EDS)

A morfologia do RIP foi observada em um microscópio eletrônico de varredura *Tabletop* da *Hitachi Oxford Instruments Analytical*, modelo TM3000 (Figura 13), do Laboratório de Tecnologia de Alimentos, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA-USP), da Universidade de São Paulo, situada em Pirassununga - SP.

As amostras de RIP foram analisadas antes e após passarem pelo processo de fragmentação. Além disso, foi realizada a espectroscopia de Raios - X por dispersão de energia (EDS), com uso do equipamento Swift ED 3000 e software versão 1.7. Essa técnica analítica foi utilizada para se efetuar a análise química elementar de uma determinada região da amostra (análise puntual).

Na preparação das amostras para o MEV foram adotados os seguintes procedimentos: as partículas de RIP foram colocadas sobre uma fita de carbono a qual, por sua vez, foi fixada no porta-amostras, o qual foi conduzido para análise no MEV.



Figura 13 – Equipamento de MEV com espectroscopia de Raios – X por EDS.

4.2.2 Caracterização física do RIP

4.2.2.1 Superfície específica - BET

A determinação de área de superfície específica do RIP foi realizada por meio da técnica BET (*Brunauer-Emmett-Teller*), obtida por absorção de nitrogênio. O equipamento utilizado para a análise foi o *Quantachrome NovaWin*. Os ensaios foram efetuados na temperatura de 77 K. As amostras foram tratadas a vácuo (100 μm de Hg) com tratamento térmico de 6 h (sem vácuo) e tratamento térmico a vácuo por 6 h, na temperatura de 110 °C. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCMAT) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de Caxias do Sul-UCS, RS.

4.2.2.2 Massa específica real

A massa específica real do RIP foi determinada por meio da utilização do multiplicnômetro a gás hélio, de marca *Quantachrome Instruments*, modelo 1000 (Figura 14). O gás hélio foi injetado no equipamento com o objetivo de preencher todos os vazios que existiam na amostra. O volume de uma massa conhecida da amostra foi então determinado por meio da variação de pressão do gás em um volume calibrado. O ensaio foi realizado no Laboratório de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e de Engenharia de Alimentos (FZEA-USP), situado em Pirassununga – SP.



Figura 14. Multiplicnômetro a gás hélio.

4.2.2.3 Distribuição granulométrica

Efetua-se a análise de distribuição granulométrica do RIP após o mesmo sofrer o processo inicial de britagem (moinho-de-mandíbulas e de martelos). Os resíduos foram coletados dos *big-bags* e enviados ao Laboratório de Ensaio Não-Destrutivos (LabEnd) da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), sendo peneirados de acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2009), que define as frações granulométricas do agregado mineral miúdo. Inicialmente, pesou-se 1000 g de material seco, o qual foi submetido ao peneiramento, utilizando-se de um agitador mecânico de peneiras (Figura 15), durante um período de, aproximadamente, 5 min. Utilizou-se a série normal de peneiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, com malhas de aberturas #4,76 mm, #2,38 mm, #1,19 mm, #0,59 mm, #0,297 mm, #0,149 mm e fundo. Após a execução do peneiramento, pesou-se a massa

correspondente ao material retido em cada peneira. Tal procedimento foi realizado em três repetições.



Figura 15. Jogo de peneira Quimis.

4.2.2.4 Granulometria a laser

O RIP moído com finura de 325 *mesh* (45 μm) foi enviado para o Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica de São Paulo- da EPUSP-USP para análise do tamanho de partículas do material coletado do processo de moinho-de-bolas. Foi utilizado o analisador de tamanho de partículas a laser (*Malvern Mastersizer 2000*), sendo utilizada a água como meio de dispersão; a faixa de medição do tamanho das partículas foi de 0,02 a 2000 μm .

4.2.3 Estudo das pastas

Para os estudos da hidratação das pastas com cimento Portland e RIP foram preparados três diferentes tipos de amostras: corpos de prova cilíndricos (5 cm de diâmetro x 10 cm de altura - NBR 7215 - 2009) e pastas nos estados fresco e em pó. Foram adotados

cinco teores de substituição do cimento pelo RIP (Referência, 10%, 20%, 30%, 40%), com as seguintes nomenclaturas; REF, CIM/10%, CIM/20%, CIM/30% e CIM/40%. Na Tabela 4, apresentam-se os dados sobre os ensaios, as idades e o número de corpos de prova.

Tabela 4. Ensaios realizados na pasta

Tipo	Ensaio	Idades(dias)	relação a/c	nº de corpos de prova
Estado endurecido	compressão (5x10cm)	7, 28, 91, 121	0,5	120
	porosimetria por intrusão de mercurio (10x10mm)	28	0,5	5
	ultrassom			
Estado fresco	calorimetria	1	0,5	5
	tempo de pega	1	0,5	5
Amostra em pó (# 325)	DRX	28, 365	0,5	10
	termogravimetria	7, 28, 91, 121	0,5	20

4.2.3.1 Estudo da cinética da reação de hidratação

O método de calorimetria utilizado foi o semi-adiabático, sendo o mesmo procedimento utilizado por Zucco (1999). Este método foi realizado para verificar a influência do RIP nas reações exotérmicas ocorridas durante a hidratação do cimento. Estas reações podem ser expressas por meio dos dados obtidos no ensaio da curva de hidratação das misturas. Foram coletadas as temperaturas máximas alcançadas pela mistura, o tempo para a sua ocorrência e a inclinação máxima das curvas. As misturas cimento/RIP/água foram depositadas em recipientes plásticos isolados, e colocadas em um recipiente de poliestireno expandido (EPS), introduzindo-se termopares tipo “J”, em cada mistura. Os dados obtidos por meio do equipamento *Fielder Logger*, marca Novus, foram exportados para uma planilha de cálculos.

Na Tabela 5, apresentam-se as quantidades de materiais utilizados no experimento.

Tabela 5. Quantidades de materiais utilizados para o ensaio de calorimetria

Traço	Cimento ARI (g)	H₂O (g)	RIP (g)
Ref	200	100	0
CIM/10%	180	100	20
CIM/20%	160	100	40
CIM/30%	140	100	60
CIM/40%	120	100	80

Hachmi *et al.* (1990), no estudo da compatibilidade química entre partículas de madeira e o cimento, sugeriram a utilização de um índice de compatibilidade (I_c) que considerasse o efeito combinado da variação da temperatura máxima, do tempo necessário para sua ocorrência e da inclinação máxima das curvas das misturas, quando confrontadas com aquelas relativas à matriz referência (sem a biomassa). No presente trabalho, buscou-se avaliar o efeito das substituições do cimento por RIP por meio do cálculo de um índice similar, conforme Equação 4.

$$I_c = 100 * \frac{trip - tc}{tc} * \frac{T_c - Trip}{T_c} * \frac{Sc - Srip}{Sc}$$

Equação (4)

Onde:

t_c - tempo máximo alcançado pela pasta de cimento;

$trip$ - tempo máximo alcançado pela pasta de cimento com RIP;

T_c - temperatura máxima alcançada pela pasta de cimento;

T_{rip} - temperatura máxima alcançada pela pasta de cimento com RIP;

Sc - inclinação máxima alcançada pela pasta de cimento;

S_{rip} - inclinação máxima alcançada pela pasta de cimento com RIP.

4.2.3.2 Ensaio de tempo de pega – NM 65 (2003)

A preparação das amostras foi realizada na Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp – FEAGRI e adotou os seguintes procedimentos:

- Os materiais (Tabela 6) foram pesados e, a seguir, aplicou-se a norma NM 65 (2003) para execução do ensaio utilizando o aparelho de Vicat, conforme Figura 16.
- A relação água/ aglomerante foi mantida em 0,50 conforme relatado por vários autores mencionados no item 3.7.

Tabela 6. Quantidades de materiais utilizados para o ensaio de tempos de pega.

Traço	Cimento ARI CP- V (g)	RIP (g)	H₂O (g)
Ref	350	0	175
CIM/10%	315	35	175
CIM/20%	280	70	175
CIM/30%	245	105	175
CIM/40%	210	140	175



Figura 16. Aparelho de Vicat

4.2.3.3 Termogravimetria

As pastas com Ca(OH)_2 foram preparadas com dois teores: 50% em massa de Ca(OH)_2 e 50% em massa de RIP moído e 70% em massa de Ca(OH)_2 e 30% em massa de RIP moído, sendo adotada a relação água/RIP+ Ca(OH)_2 de 1,0. Também foram produzidas quatro diferentes pastas de cimento com RIP (CIM/10%, CIM/20%, CIM/30% e CIM/40%), além da pasta referência, com relação água/ CIM+RIP de 0,5, conforme Tabela 7.

Para o preparo das amostras, misturou-se o material seco em um recipiente plástico e, em seguida, foi colocada a água deionizada e efetuou-se a mistura até se obter uma pasta homogênea. Após a preparação das pastas, os recipientes plásticos foram fechados e colocados em uma câmara úmida à temperatura de $25 \pm 2^\circ \text{C}$, no Laboratório de Materiais e Estruturas, da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp.

Tabela 7. Quantidades de materiais utilizados para o ensaio de termogravimetria.

Traço	cimento ARI (g)	H₂O (g)	Ca(OH)₂	RIP (g)
Ref	30	15	-	0
CIM/10%	27	15	-	3
CIM/20%	24	15	-	6
CIM/30%	21	15	-	9
CIM/40%	18	15	-	12
Ca(OH)₂ + RIP	-	30	15	15
Ca(OH)₂ + RIP	-	30	21	9

Nas respectivas idades (7, 28, 91 e 121) das pastas, foram extraídas pequenas amostras dos recipientes plásticos, as quais foram transferidas e moídas em um almofariz de ágata (Figura 17a e Figura 17b).

Para interromper o processo de hidratação da pasta foi adicionada a acetona no almofariz contendo o material moído (CASSAGNABÈRE, 2009; RODRIGUES, 2012).

As amostras moídas foram então filtradas (Figura 18) e o material resultante foi levado à estufa a 60°C para secagem durante 1 h. Em seguida, foram armazenadas em tubos Eppendorf, (Figuras 19) e levadas ao Laboratório de Construções e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e de Engenharia de Alimentos (FZEA-USP), situado em Pirassununga – SP.

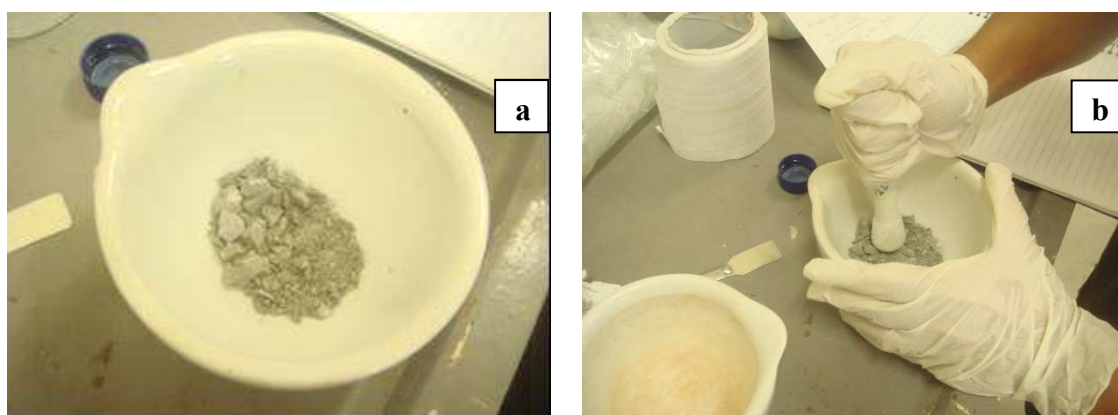


Figura 17. Preparação da pasta (a) e (b).



Figura 18. Filtragem da pasta.



Figura 19. Armazenamento em

Nos estudos das pastas de cimento tubos Eppendorf. ante útil, pois permite observar as reações de desidratação, tais como: desidratação do silicato de cálcio hidratado, decomposição do silicato aluminato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado e a desidroxilação do hidróxido de cálcio. A partir desta última desidratação, torna-se possível avaliar a quantidade de CH que não reagiu com a pozolana, determinando-se a quantidade de CH fixada pela pozolana na pasta (RODRIGUES, 2012).

O cálculo da CH consumida (CH_{cons}) em pastas com cimento foi realizado por meio da diferença de massa da amostra entre 35 °C e 600 °C, conforme as Equações 6 e 7.

$$CH_{cons} = \frac{[(CH_C) \cdot C_{\%}] - (CH)_{RIP}}{[(CH_C) \cdot C_{\%}]} \quad \text{Equação (6)}$$

$$CH_c = \frac{H}{PM_H} \cdot PM_{CH} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

CH_c - quantidade de CH na pasta controle (com cimento Portland);

CH_{RIP} - quantidade de CH na pasta com RIP;

$C\%$ - teor de cimento na pasta;

H - perda de água entre as temperaturas de 35 °C a 600 °C;

PM_H - peso molecular da água;

PM_{CH} - peso molecular do hidróxido de cálcio.

Para calcular a porcentagem de CH consumida (CH_{cons}) nas pastas com hidróxido de cálcio utilizou-se a Equação 8:

$$CH_{cons} = \frac{(CH)_o - (CH)_{RIP}}{(CH)_o} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

CH_o - quantidade inicial de CH na pasta;

CH_{RIP} - quantidade final de CH na pasta.

O conteúdo de CH na pasta está relacionado a dois processos: a liberação dos produtos de hidratação e/ou à reação desses produtos com a pozolana (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A água combinada é outra informação importante que pode ser obtida por meio dessa técnica, pois se encontra relacionada à perda total de massa da amostra avaliada; com essa informação torna-se possível avaliar a porcentagem dos produtos de hidratação formados. A água combinada foi calculada com base na porcentagem de perda de massa total (entre 35 °C a 600 °C), subtraída da porcentagem de perda de água entre 400 °C e 600 °C.

4.2.3.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados no porosímetro pertencente ao Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, localizado no Departamento de Engenharia de Materiais/Universidade Federal de São Carlos.

As amostras para ensaio de porosimetria das pastas com RIP foram confeccionadas com dimensões aproximadas de 10 mm x 10 mm x 10 mm.

O equipamento utilizado foi um porosímetro de mercúrio da marca Aminco modelo 5000 psi- USA, com pressão máxima de 5000 psi, tendo sido utilizada apenas uma amostra para cada pasta.

4.2.3.5 Difração de Raios - X (DRX) nas pastas

As amostras para ensaio de DRX foram confeccionadas a partir dos corpos de prova provenientes do ensaio de compressão simples, nas idades de 28 dias e 365 dias, para os teores de substituição 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. As amostras foram trituradas e moídas sendo escolhida a fração passante na peneira de 200 *mesh* (75 μ m). As amostras em forma de pó foram acondicionadas em frascos plásticos e levadas ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), no Instituto de Pesquisas Tecnológicas- IPT - SP.

O ensaio foi realizado com auxílio do equipamento *Rigaku*, modelo *Windmax* 2000, operando na radiação $K\alpha$ do cobre com 40 kV – 30 mA, varredura de 3° a 70° e tempo de corrida de 1°/min.

A identificação dos compostos foi executada por meio do software *X-pert HighScore Plus* (versão 2.2) da *Panalytical* e os padrões difratométricos foram fornecidos pelo ICCD (*International Center for Diffraction Data*) com a base de dados de minerais e cimento.

4.2.3.6 Ensaio não destrutivo por ultrassom

Após a desmoldagem, os corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm foram identificados, pesados e submetidos ao ensaio não destrutivo (END) por ultrassom. Para tal, utilizou-se o equipamento *UsLab*, do fabricante *Agricef* (Figura 20), dispondo de transdutores exponenciais com frequência de ressonância de 45 kHz. Os transdutores foram

posicionados no centro das faces opostas do corpo de prova, em pontos previamente marcados para garantir que as medições posteriores seriam efetuadas na mesma região. A velocidade de propagação da onda ultrassônica foi calculada dividindo-se o comprimento do corpo de prova (em mm) pelo tempo de propagação (em μ s), obtendo-se a velocidade em km/s. Logo após a medição do tempo de propagação, os corpos de prova eram novamente encaminhados à câmara úmida, até que uma nova medição fosse efetuada.



Figura 20. Ultrassom, modelo: USLab.

Variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica ao longo do tempo de cura do corpo de prova

O ensaio não destrutivo (END) por ultrassom foi aplicado aos corpos de prova durante a etapa de cura, nas idades de 7, 28, 91 e 121 dias, buscando-se avaliar possíveis modificações na magnitude da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) através dos mesmos. Na primeira avaliação, realizada na idade de 7 dias, todos os corpos de prova foram testados. Porém, a cada idade, após o ensaio de END eram selecionados 6 corpos de prova para o ensaio de compressão simples. Os demais corpos de prova retornavam à câmara úmida para a continuidade da etapa de cura.

O comportamento da curva da VPU em função da idade dos corpos de prova é assintótico, tendendo a um valor limite, denominado de V_{\max} (BERALDO e BALZAMO, 2009). A partir desse valor, torna-se possível obterem-se as curvas referentes às diferentes misturas, por meio da Equação 9:

$$V_i = v_{\max}[1 - \exp(A + B \cdot i)] \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

V_i - VPU na idade i (em dias);

V_{\max} - VPU máxima, obtida empiricamente;

i - idade do corpo de prova;

A e B - coeficientes obtidos por regressão linear.

O coeficiente “A” pode ser relacionado ao endurecimento inicial da pasta – quanto maior o seu valor, mais rápido endureceu a pasta nas 24 h (idade quando foi efetuada a primeira avaliação da VPU). Por sua vez, o coeficiente “B”, geralmente negativo, relaciona-se com a desaceleração, ou seja, com a rapidez de convergência da VPU em direção ao valor máximo (V_{\max}).

4.2.3.7 Ensaio de compressão simples

Na preparação da pasta foram adotados os seguintes procedimentos:

- O cimento Portland CP-V-ARI e o RIP foram pesados para confecção de 120 corpos de prova, conforme Tabela 8 e 9, e homogeneizados em um recipiente plástico e, a seguir, transferidos para uma cuba metálica do misturador.

Tabela 8. Teores de substituição utilizados na confecção dos corpos de prova no ensaio de compressão

Misturas	Cimento ARI (kg)	H₂O (kg)	RIP (kg)
Ref	60	30	0
CIM/ 10%	54	30	6
CIM/ 20%	48	30	12
CIM/ 30%	42	30	18
CIM/ 40%	36	30	24

Tabela 9. Números de corpo de prova

	Idade (dias)			
	7	28	91	121
Ref	6	6	6	6
CIM/ 10%	6	6	6	6
CIM/ 20%	6	6	6	6
CIM/ 30%	6	6	6	6
CIM/ 40%	6	6	6	6

- A cuba metálica com o material homogeneizado foi levada até um misturador planetário no qual se adicionou a água deionizada. Iniciou-se a mistura dos materiais na velocidade baixa (140 ± 10 RPM) durante 2 min, adicionando-se 70% da massa total de água;
- Adicionou-se os 30% de água restante e misturou-se durante 3 min na velocidade alta (280 ± 10 RPM) e, a seguir, foi realizada a moldagem dos corpos de prova cilíndricos.
- O adensamento foi realizado em três etapas, em mesa vibratória (frequência de 60 Hz), sendo adotado o tempo de 10 s entre um adensamento e outro;
- Os corpos de prova foram mantidos em cura úmida, em ambiente com temperatura de 24 ± 2 °C, até as idades de realização dos ensaios (7, 28, 91 e 121 dias).

No ensaio de compressão simples foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL - 30000, equipada com uma célula de carga de 300 kN. A velocidade de deslocamento do atuador foi de 0,3 mm/min (RODRIGUES, 2012). O ensaio mecânico das pastas foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas, da Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas. Os dados foram analisados por meio de

um software estatístico *Statgraphics 4.1* e submetidos à análise multifatorial de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de *Least Significance Difference - LSD*, ao nível de 95% de probabilidade estatística.

4.2.3.8 MEV das pastas

A morfologia das pastas com RIP foi observada em um microscópio eletrônico de varredura *Tabletop* da *Hitachi Oxford Instruments Analytical*, modelo TM3000, do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais- DEMA, da Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, situada em São Carlos - SP.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Além dos resultados dos ensaios apresentado neste capítulo, também foi realizada uma análise econômica comparando o uso do RIP e a CCA, na fabricação de blocos vazados de concreto (Anexo –D).

5.1 Caracterizações mineralógica, química, física e ambiental do RIP

5.1.1 Composição química e perda ao fogo

Na Tabela 10, apresenta-se o resultado das constituições químicas do RIP e da CCA, obtidas por meio da espectroscopia por FRX. Na comparação entre os teores obtidos, observa-se na CCA a predominância da sílica (93,50%), enquanto que no RIP, esse valor é mais limitado (69,50%). Na comparação com a CCA comercial, o valor da somatória dos óxidos encontrado foi de 93,68 %, valor este superior ao do RIP, e ao encontrado por Tashima *et al.* (2012). Os autores afirmaram encontraram um teor de sílica de 83,53% e somatória de óxido de 85,81%.

Conforme será relatado a seguir no item 5.1.3, o óxido de chumbo (PbO) é resultante da contaminação do isolador pelo material empregado na conformação da rosca da haste de pino de topo.

Tabela 10. Composição química (% em óxidos) e perda ao fogo (PF) do RIP e CCA.

	RIP	CCA		RIP	CCA
	% em óxidos	% em óxidos		% em óxidos	% em óxidos
Na₂O	1,61	-	Cr₂O₃	0,06	-
MgO	0,31	0,27	MnO	0,06	0,29
Al₂O₃	21,4	0,13	Fe₂O₃	0,982	0,049
SiO₂	69,5	93,5	CuO	0,007	-
P₂O₅	0,1	0,46	ZnO	0,023	0,006
SO₃	0,01	0,06	Rb₂O	0,032	0,01
Cl	0,01	0,05	SrO	0,007	-
K₂O	4,21	1,42	ZrO₂	0,036	-
CaO	0,64	0,44	PbO	0,308	-
TiO₂	0,33	-	PF	0,37	3,36

Na Tabela 11, apresenta-se a comparação das características do RIP, de acordo com as prescrições da NBR 12.653 (2014) e de duas normas internacionais, a IS 1344 (2008) e ASTM C 618 (2012). Todas estabelecem que para que um material seja considerado uma pozolana, a somatória dos óxidos SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ deve ser de, no mínimo, 70%. O valor da somatória dos óxidos encontrada para o RIP foi de 91,88%, dessa atendendo às exigências das normas.

Materiais similares ao RIP apresentaram resultados semelhantes na somatória dos óxidos. Patel *et al.* (2015), em seu estudo com o resíduo de pó de porcelana sanitária,

observaram que a somatória dos óxidos foi de 90,52%, sendo similar ao RIP. Higashiyama *et al.* (2012) observaram que a somatória dos óxidos do RIP, proveniente da companhia elétrica japonesa Tepco, utilizado em seu estudo, foi de 92,81%. Em outro estudo, com resíduos de isoladores elétricos da empresa japonesa Kanden L&A Company, Ltd, Higashiyama *et al.* (2015) observaram que a somatória dos óxidos foi idêntica àquela encontrada com os resíduos da empresa Tepco. O teor de SO₃ encontrado na amostra de RIP foi de 0,015% e a perda ao fogo (PF) de 0,37%, tendo ambos os resultados também atendidos às normas. Raval *et al.* (2013) verificaram que a perda ao fogo do resíduo de pó cerâmico proveniente do polimento de indústrias cerâmicas foi de 1,61%.

Tabela 11. Comparativo de Normas para materiais pozolânicos.

	NBR12.653 2014	ASTM618-C 2012	IS 1344	RIP	CCA
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	≥70	≥70	≥70	91,88	93,68
SO ₃	≤ 5	≤ 4	≤ 3	0,02	0,06
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	-	-	-
Perda ao Fogo	≤ 10	≤ 10	5	0,37	3,36
Álcalis disponiceis em Na ₂ O	≤ 1,50	≤ 1,50	-	4,30	0
Material retido na peneira 45µm, % máx	34	34	12	12	-

Cumpre esclarecer que o teor de álcalis disponíveis em Na₂O encontrado na amostra de RIP foi de 4,30%, sendo muito superior àquele permitido pelas normas, para as quais o valor de teor máximo deveria ser de 1,50%. Pozolanas com valores acima do permitido pelas normas poderiam favorecer o aparecimento de reações álcalis-agregado (RAA), que são reações químicas que se desenvolvem entre constituintes reativos dos agregados e os íons alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial da pasta de cimento, podendo ter um efeito altamente prejudicial para artefatos de concreto. Estas reações são de caráter fortemente expansivo, levando ao desenvolvimento de tensões internas no material e consequente fissuração, frequentemente acompanhadas do aparecimento de eflorescências e exsudações à superfície (RIBEIRO *et al.*, 2012). No entanto, medidas mitigadoras desse inconveniente podem ser adotadas, tais como a utilização de cimento de alto forno, tipo CPIII, por seu elevado teor de escória de alto forno (ABCP, 2015).

A perda ao fogo da CCA foi de 3,36%, sendo quase 10 vezes superior ao RIP, mas ambos os materiais atenderam às normas. Conforme descrito por Mantuano Netto (2006), valores de perda ao fogo superiores a 10% podem estar relacionados a impurezas presentes na amostra.

No entanto, no ensaio de FRX detectou-se a presença de chumbo (PbO) e alumínio (Al) na composição do RIP, em porcentagens muito superiores às permitidas pela ABNT NBR 10.004 (2004), conforme será abordado no item 5.2.2.

Lima e Rossignolo (2010), em seu trabalho sobre a pozolanicidade da cinza de casca de caju, encontraram valores de teor de álcalis acima do permitido, e mesmo assim os autores sugeriram que somente a análise química não seria determinante para descartar o material, pois os ensaios normativos existentes para determinação da pozolanicidade de adições minerais mostraram-se incompletos, não fornecendo subsídios para a análise da reatividade por outros parâmetros, tais como a quantidade de material amorfo presente na amostra.

5.1.2 Difração de Raios - X (DRX)

Na Figura 21, apresenta-se o resultado do ensaio de DRX aplicado ao RIP. No difratograma, os minerais identificados nas fases cristalinas foram o quartzo (SiO_2) e a mulita ($\text{Al}(\text{Al}_{1,272} \text{Si}_{0,728} \text{O}_{4,864})$).

O resultado obtido corrobora com o estudo de Vieira *et al.* (2006), no qual foram reutilizados resíduos provenientes do processamento mecânico de rochas ornamentais em mistura com argila, visando à obtenção de porcelana elétrica (como isolador de baixa tensão). Os autores identificaram, através do DRX, as fases cristalinas após sinterização e que foram também similares às aquelas apresentadas pelas porcelanas tradicionais, constituída de quartzo, mulita, e fase vítrea. Os resultados mostraram que os resíduos provenientes da produção industrial de rochas ornamentais poderiam substituir o quartzo e o feldspato da massa típica de porcelana, além de reduzir a temperatura de sinterização.

Da mesma forma, Torkittikul e Chaipanich (2010) pesquisaram a utilização de resíduos obtidos em indústrias cerâmicas em substituição à areia fina como agregado e concluíram que o teor ideal de substituição seria de 50%. Na análise das fases cristalinas por DRX, os autores identificaram a mulita nas amostras.

Bonetti *et al.* (2009), em seu estudo sobre o desenvolvimento de uma porcelana quartzosa para isoladores elétricos, identificaram nas análises de DRX, o quartzo e mulita.

Na Figura 21, apresenta-se os difratogramas do RIP (preto) e da CCA (vermelho) situados na região 2θ , entre os ângulos de Bragg, 2θ , 15° a 34° e entre os ângulos de Bragg, 2θ , 15° a 30° , respectivamente, e que estão relacionados com o estado amorfo da sílica. O óxido predominante é o dióxido de silício (SiO_2 - sílica), representado pela cristobalita (C).

Da mesma forma, Pouey (2006), Rodrigues e Beraldo (2010) e Vasconcelos e Akasaki (2010) observaram um difratograma similar para as CCA estudadas em seus experimentos. Observa-se que a banda amorfa da CCA é maior do que a do RIP, o que permite concluir que a CCA é mais reativa do que o RIP.

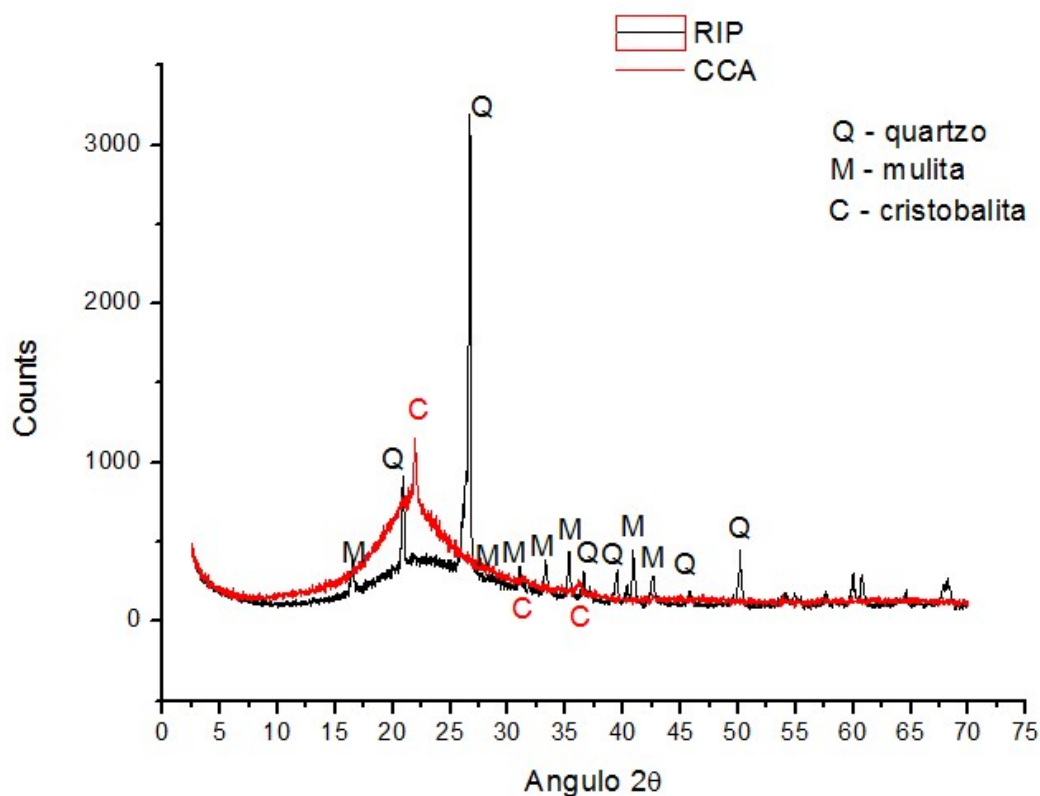


Figura 21. Difratogramas do RIP e CCA.

5.1.3 Caracterização ambiental do RIP – ABNT NBR 10.004 (2004)

De acordo com relatório de ensaio 60061/2014, executado pela empresa TASQA, conforme anexo B, o RIP moído foi classificado como pertencente à classe de *Resíduo Classe I – Perigoso*, devido ao fato de que no extrato lixiviado (ABNT NBR 10.005/ 2004) o teor de chumbo apresentou concentração muito superior (em 125 vezes) ao valor máximo estipulado no anexo F da citada norma. No extrato solubilizado (ABNT NBR 10.006/2004), o teor de alumínio também apresentou concentração superior (em 59 vezes) ao estipulado; a concentração de chumbo ainda se mostrou muito elevada (em 20 vezes), ao valor indicado no anexo G da citada norma.

A partir desses resultados foram propostas soluções para reduzir o grau de contaminação presente no RIP. Dentre as alternativas existentes destacam-se:

- realizar o rastreamento dos contaminantes a fim de conhecer sua origem e, caso fosse possível, efetuar-se sua eliminação;

- realizar o encapsulamento e a diluição do potencial efeito contaminante do resíduo em uma matriz inorgânica ou orgânica e, posteriormente, verificar se os novos resultados de lixiviação e de solubilização atenderiam à norma.

Com base nestas análises, houve a necessidade de se rastrear a fonte de contaminação a fim de se evitar a classificação do RIP como resíduo pertencente à classe I (perigoso), segundo a ABNT NBR 10.004 (2004). Durante o processo de descarte na EA's, os isoladores de porcelana são colocados nas caçambas pré-determinadas, porém sem que ocorra a separação das hastes ou pinos de topos, que são elementos de fixação dos isoladores nas cruzetas. Observou-se, que ao ser retirado do isolador, a haste (pino de topo) deixa fragmentos do material de sua rosca de fixação. Este material foi analisado por MEV e EDS, conforme Figura 22 e EDS Figura 23, tendo sido detectadas as presenças de chumbo (Pb) e de alumínio (Al). Isto permitiu concluir que a fonte de contaminação é originada do material utilizado na rosca da haste (pino de topo).

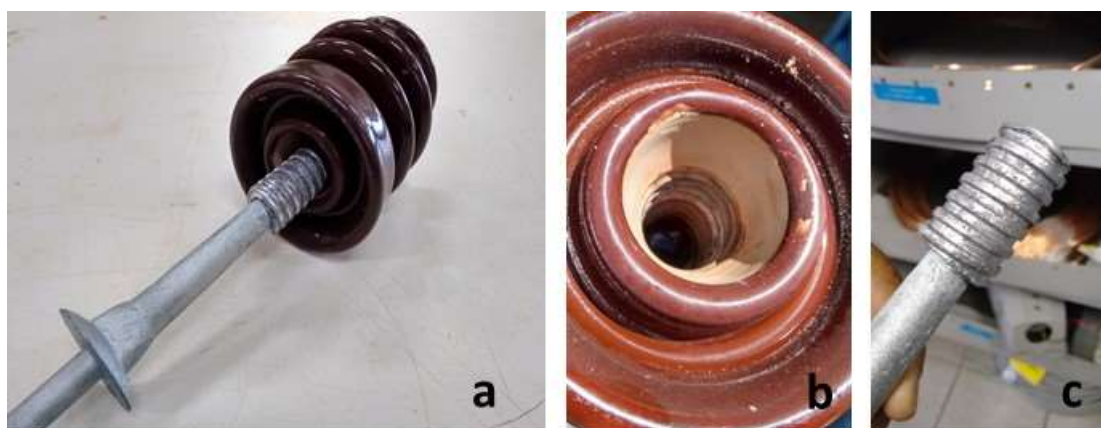


Figura 22. (a) Conjunto isolador de porcelana e haste- pino de topo, (b) isolador com fragmento da haste, (c) haste – pino de topo com rosca em chumbo e alumínio.

Com finalidade de esclarecer se a contaminação do RIP seria diminuída ou até mesmo eliminada ao ser misturada com outros agregados, foram moldados blocos vazados de concreto sem função estrutural, conforme ABNT NBR 6136 (2006). Adotou-se o teor de 20% de substituição de cimento CPV-ARI por RIP e, após 28 dias, os blocos de concretos vazados foram analisados. Os resultados dos ensaios prescritos pela NBR 10.004 (2004) demonstraram que o Pb e Al encontrados na amostra em forma de pó, não foram nem

lixiviados nem solubilizados após a moldagem. Tal fato permite concluir que se torna então possível realizar-se a aplicação do resíduo de forma segura em matrizes cimentícias com finalidade de encapsular os contaminantes e assim diluir o efeito nocivo do RIP.

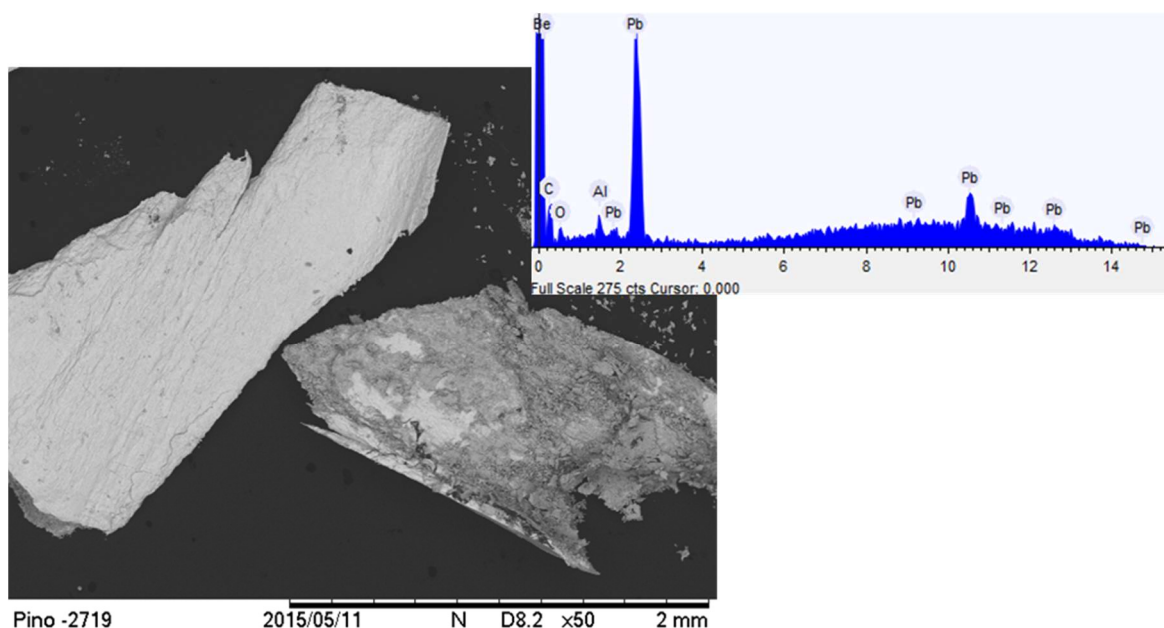


Figura 23. MEV e EDS do material utilizado na fabricação da rosca da haste pino de topo.

5.1.4 Massa específica real do RIP

O valor da massa específica real encontrada para o RIP foi de $2,52 \text{ g/cm}^3$. Higashiyama *et al.* (2012) encontraram um valor de massa específica de $2,30 \text{ g/cm}^3$ para o RIP descartado pela companhia elétrica japonesa Tepco. Em outro estudo com RIP, proveniente da empresa japonesa, Kanden L&A Company, Ltd, Higashiyama *et al* (2015) encontraram um valor de massa específica real de $2,40 \text{ g/cm}^3$ para uma distribuição granulométrica entre 0,075 mm a 5,00 mm.

O cimento CPV-ARI 40, utilizado no ensaio experimental, tem massa específica de $3,10 \text{ g/cm}^3$, segundo informação do fabricante. Já para a CCA comercial, a massa específica real encontrada foi de $2,03 \text{ g/cm}^3$. Segundo Oliveira (2013), a utilização de materiais com uma acentuada diferença de massa específica real entre si em uma mistura, pode favorecer uma segregação dos componentes. Este fenômeno pode provocar gradientes de densidade de empacotamento na mistura, prejudicando o desempenho físico-mecânico do material produzido.

5.1.5 Superfície Específica - BET

A magnitude da superfície específica é outro parâmetro importante para se avaliar as características físicas do RIP. O valor encontrado para superfície específica do RIP foi de $1.433 \text{ cm}^2/\text{g}$, sendo tal valor 4,5 vezes inferior àquele encontrado para o cimento CPV-ARI utilizado nos ensaios, que é da ordem de $6.432 \text{ cm}^2/\text{g}$. Segundo Bignozzi e Bonduà (2011), resíduos do polimento de pedra com superfície específica de $25.900 \text{ cm}^2/\text{g}$, possibilitaram maior refinamento dos poros e, conseqüentemente, permitiram maior durabilidade em relação ao concreto convencional para idades superiores a 28 dias.

A CCA comercial, utilizada como comparação, apresentou um valor de $8.374 \text{ cm}^2/\text{g}$, indicando que a área superficial do RIP foi 5,84 vezes inferior a esse valor. Estes resultados corroboram com os resultados de granulometria a laser, na qual o cimento CPV-ARI se encontra numa faixa granulométrica inferior à do RIP. Cordeiro (2006) afirmou que fragmentação das partículas de materiais pozolânicos se mostra necessária para ativar suas reações químicas; as taxas de reação são proporcionais à superfície específica do material, que varia com o inverso do tamanho das partículas. Os resultados mostram que o RIP é menos poroso em relação ao cimento CPV-ARI e à CCA.

5.1.6 Distribuição do tamanho de partículas do RIP

Foi realizada uma primeira classificação granulométrica das partículas do RIP referentes ao processo contínuo de britagem utilizando-se o moinho-de-mandíbulas e o moinho-de-martelos, posicionados em linha. A Tabela 12 mostra que o módulo de finura atingido foi de 2,44, semelhante ao de uma areia de finura média. O diâmetro máximo do RIP foi de 4,80 mm.

Tabela 12. Classificação granulométrica após o processo de britagem.

Peneira (mm)	(%) retida acumulada
4,8	3
2,4	9
1,2	26
0,6	52
0,3	70
0,15	83
FUNDO	100
TOTAL	244
MÓDULO DE FINURA	2,44
DIÂMETRO MÁXIMO (mm)	4,80

Na Tabela 13, apresentam-se os resultados referentes à segunda classificação granulométrica, a laser, após ser efetuado o processo de moagem do RIP, em um moinho-de-bolas industrial, na qual 90% das partículas se encontram abaixo de 48,92 μm . No cimento CPV- ARI utilizado nos ensaios com as pastas observa-se que 90% das partículas se encontram abaixo de 29,02 μm .

Tabela 13. Diâmetro equivalente das partículas

	$D_{10}(\mu\text{m})$	$D_{50}(\mu\text{m})$	$D_{90}(\mu\text{m})$	Diâmetro médio (μm)
CPV- ARI	3,60	11,79	29,02	14,34
RIP	2,96	14,10	48,92	20,78

Legenda: D_{10} : tamanho de partículas abaixo do qual se situa 10% do material; D_{50} : tamanho de partículas abaixo do qual se situa 50% do material; D_{90} : tamanho de partículas abaixo do qual se situa 90% do material

Conforme se pode observar nos resultados de granulometria laser obtidos do RIP (Anexo C), apenas 12,28% de partículas encontram-se acima de 45 μm , o que permite concluir que o processo de fragmentação escolhido possibilitou atender às especificações requeridas pelas normas ASTM 618 C (2015) e ABNT NBR 12.653 (2014), conforme Tabela 14, com exceção da norma indiana IS-1344. As normas permitem que, no máximo, 34%, 34% e 12% de partículas se situem acima de 45 μm , respectivamente.

Na Figura 24, mostra-se a sobreposição entre a distribuição granulométricas do cimento Portland CPV- ARI e o RIP. Esta sobreposição pode interferir no empacotamento

das partículas dificultando sua movimentação no sistema e afetar o comportamento reológico da pasta no estado fresco, já que o RIP possui partículas com formato irregular (OLIVEIRA *et al.*, 2000)

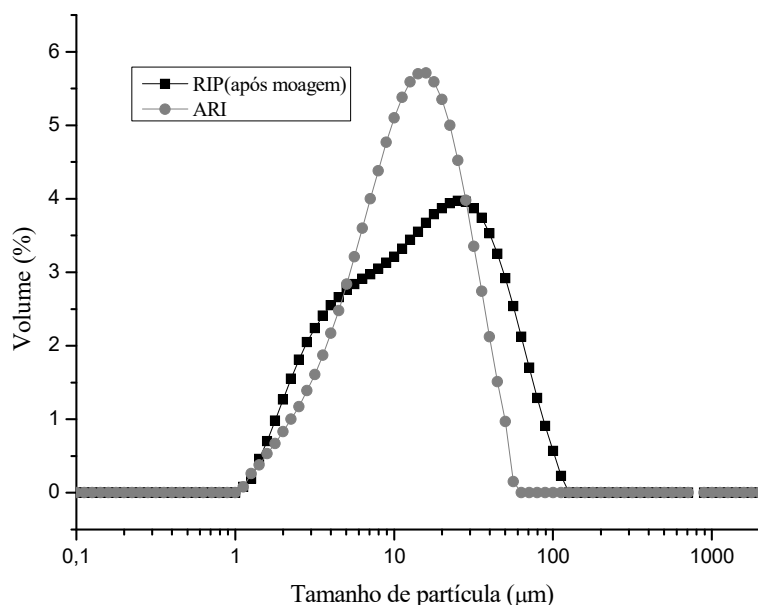


Figura 24. Granulometria do cimento CPV-ARI vs RIP.

5.1.7 Avaliação da pozolanicidade do RIP por meio do ensaio de condutividade elétrica

O desenvolvimento da reação de pozolana/hidróxido de cálcio causa a formação de produtos insolúveis, diminuindo a concentração de Ca(OH)_2 na solução. O decréscimo de íons de Ca^{2+} devido ao aumento de fases de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) diminui a condutividade elétrica, o que irá influenciar a velocidade da reação, a qual, por sua vez, depende se a reatividade da pozolana for elevada ou baixa (VILLAR-COCIÑA, 2005).

Esse ensaio consiste em realizar medições da condutividade elétrica de uma solução de hidróxido de cálcio e de resíduos de isoladores elétricos de porcelana (RIP).

Na Figura 25, observa-se que nos primeiros 1000 s, a perda relativa de condutividade elétrica do RIP foi de 7,41%, devido ao fato de que neste período o RIP ainda estava sendo dissolvido na solução. No período de 10.000 s, a solução CA(OH)_2 / RIP apresentou perda relativa de 14,85%; acima do período de 10.000 s se observou a maior faixa de perda relativa de condutividade elétrica atingindo 88,31%. Após o período de 28 h (100.000 s) percebe-se uma tendência de estabilização no valor dos dados coletados. Em

relação à CCA utilizada para comparação, observa-se que no período de 10.000 s, a perda de sua condutividade atingiu uma faixa entre 70% a 80%.

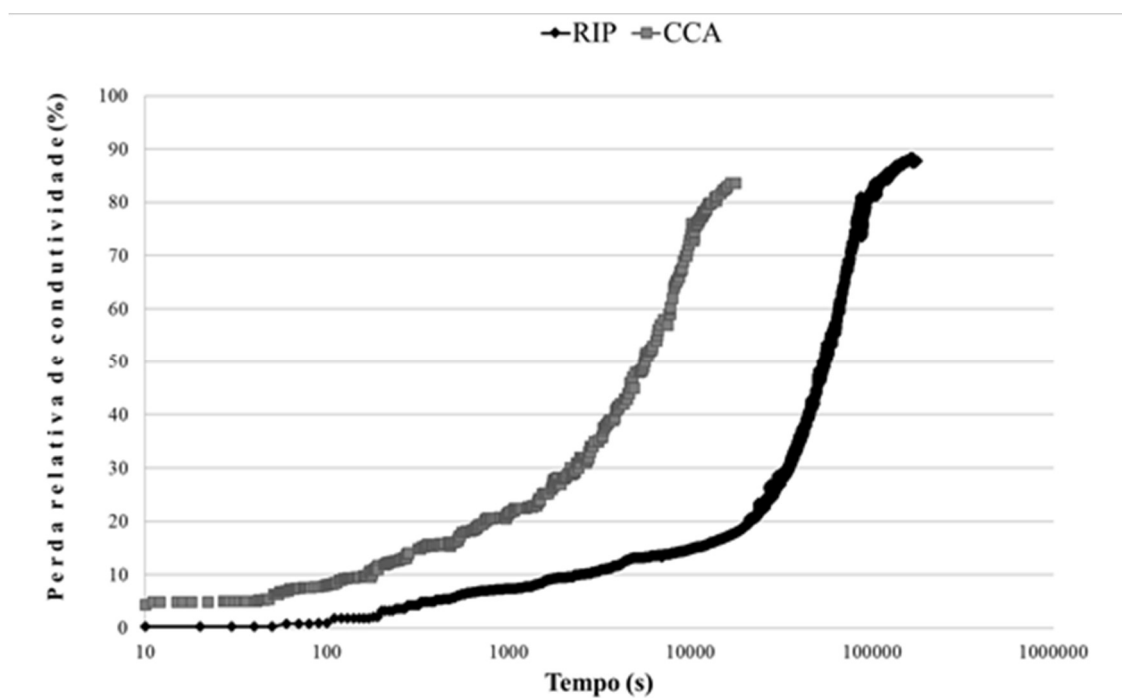


Figura 25. Curva de perda de condutividade elétrica versus tempo para a solução de RIP e CCA

Rodrigues (2012), em um trabalho similar com cinza de casca de arroz (CCA), observou alta reatividade das cinzas, na qual a perda de condutividade elétrica da CCA, após período de 10.000 s, situou-se entre 21% a 30%. Porém, a autora não conseguiu observar a estabilização dos dados no período adotado de 85000 s.

Nakanishi (2013), em seu trabalho com cinza de capim elefante, comprovou alta reatividade do material, tendo encontrado para o período de 10.000 s perda relativa de condutividade elétrica superior a 95%.

Na comparação entre ambos se observou que a CCA reage mais rápido quando comparada ao RIP.

5.1.8 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e Espectroscopia de Raios - X por dispersão de Energia - EDS

O RIP britado foi avaliado por MEV, conforme micrografias com aumento de 500x (Figura 26) e por análise de EDS, permitindo identificar as presenças de chumbo (Pb) e de alumínio (Al), ambos originados da haste de pino de engaste, conforme relatado anteriormente.

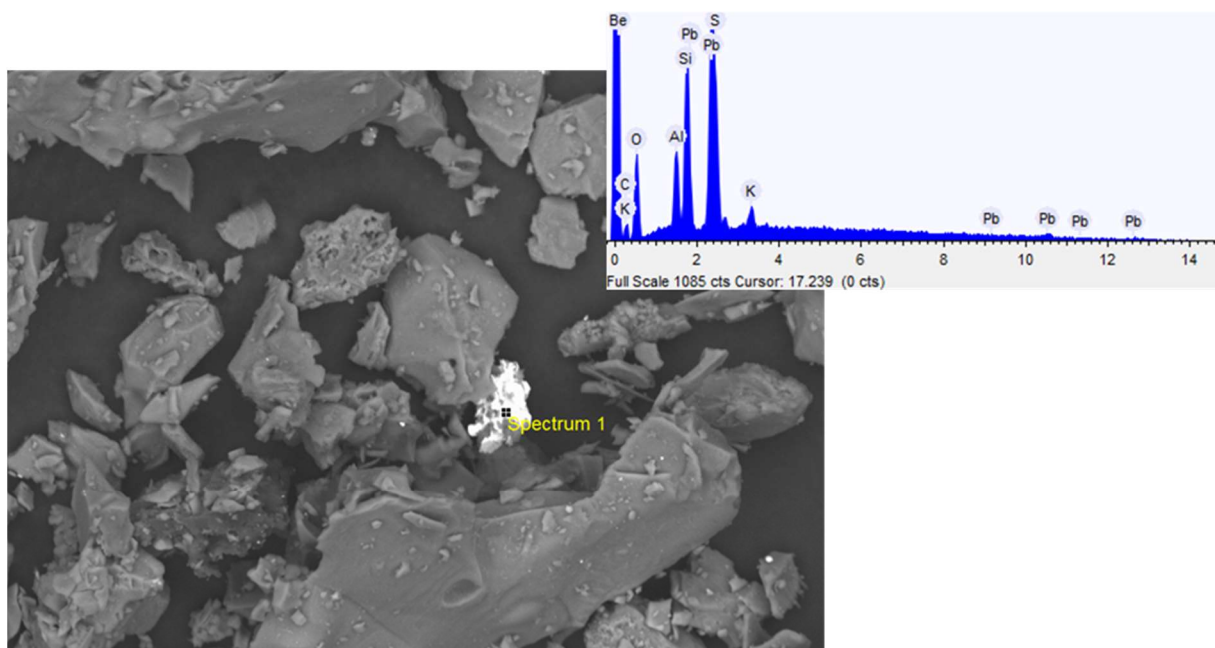


Figura 26. MEV do RIP após processo de britagem.

Aumento de 500x - Accelerating voltage (kV) :15.0

Os mesmos elementos químicos, Pb (chumbo) e Al (alumínio) também foram encontrados na amostra de RIP após ser submetida ao processo de moagem, conforme Figura 27 (aumento de 2000x) e a análise de EDS. Os resultados corroboraram com os valores obtidos nos ensaios da ABNT NBR 10.004 (2004) e do FRX, tendo sido possível quantificar os elementos e compará-los com os limites máximos permitidos de 0,01 mg/L para o chumbo e 0,20 mg/L para o alumínio.

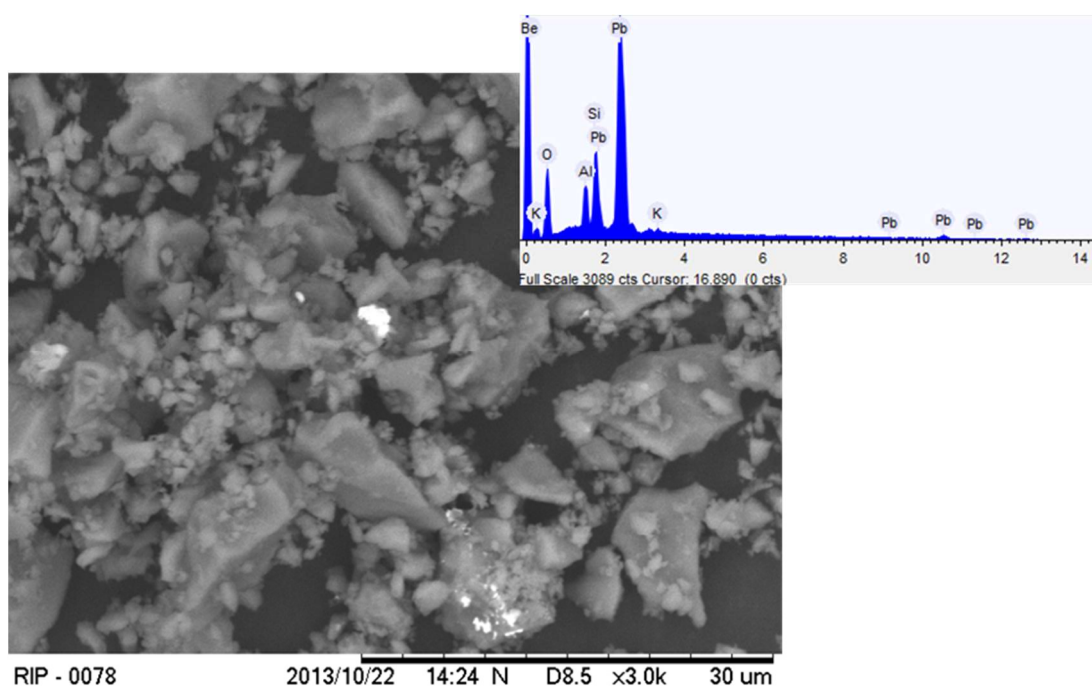


Figura 27. MEV e EDS do RIP após processo de moagem

Aumento: 3000 x *Accelerating voltage* (kV) : 15.0

Nas Figuras 28a e 28b (aumento de 3000x) e 29a e 29b (aumento de 5000x), apresentam-se os resultados obtidos na microscopia eletrônica de varredura (MEV) aplicada à CCA. Pode-se observar a estrutura porosa e fibrosa da CCA, e tal tipo de estrutura explica o motivo pelo qual a área superficial do CCA é superior àquela do RIP, corroborando com o resultado de BET, que indicou que a área específica da CCA foi de 5,84 vezes a do RIP.

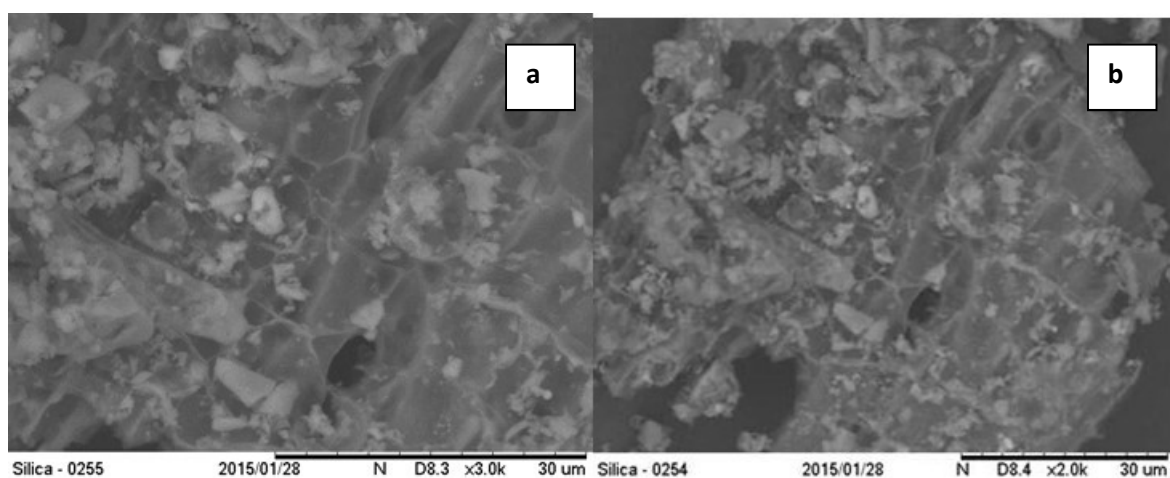


Figura 28a e 28b. MEV da cinza da casca de arroz.

Aumento: 3000x *Accelerating voltage* (kV) :15.0

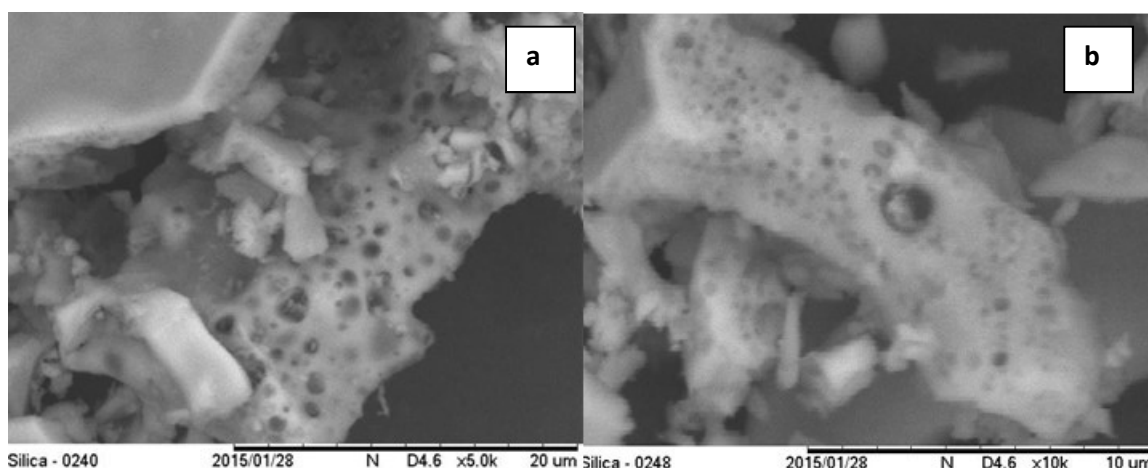


Figura 29a e 29b. Micrografias da cinza de casca de arroz.

5000x

Accelerating voltage (kV) :15.0

5.2 Avaliação das pastas

5.2.1 Calor de hidratação

Na Figura 30, apresenta-se a cinética da temperatura de reação das diferentes pastas de cimento podendo-se observar que para a pasta com substituição de cimento por 10% de RIP não houve interferência significativa na reação de hidratação, ocorrendo praticamente uma coincidência com a curva referente à pasta controle. Observa-se que para as demais situações analisadas, as curvas foram deslocadas para a direita indicando um retardo significativo dos picos de ocorrência das temperaturas máximas, de até 15,5%, para o teor de 40% de substituição, quando comparadas à pasta de cimento. Tal fato podia ser esperado, visto que as reações de um material pozzolânico são mais lentas do que aquelas da pasta de cimento convencional.

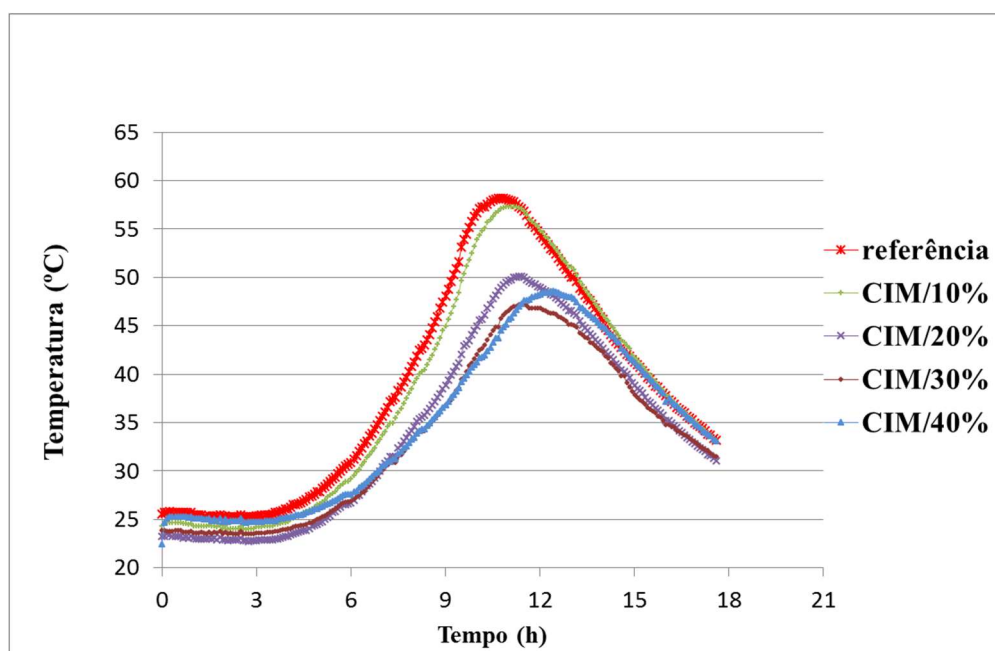


Figura 30. Cinética de temperatura para RIP.

Quanto à diminuição na temperatura máxima alcançada pelas misturas, para as pastas com substituições de cimento por CIM/20%, CIM/30% e CIM/40% de RIP observou-se que houve uma redução significativa, em relação à pasta controle, na temperatura máxima atingida, da ordem de 8 - 10 °C, indicando, dessa forma, uma possível interferência desses níveis de substituição na cinética da reação do cimento, observando-se reduções da temperatura máxima da ordem de 19%, para o teor de substituição de CIM/30% (Tabela 14).

Outro aspecto, de uma forma geral, a ser destacado, refere-se à inclinação máxima das curvas, pois quanto maior for tal inclinação mais intensa se mostrariam as reações de hidratação. Observou-se que, independentemente do teor de substituição, em torno das 9,50 h ocorreu a inclinação máxima de todas as pastas.

Para a pasta controle, a inclinação máxima foi da ordem de 0,30 °C/min, enquanto para os teores de substituição de CIM/10%, CIM/20%, CIM/30% e CIM/40%, as inclinações máximas (em °C/min) foram de 0,26, 0,18, 0,18 e 0,12, respectivamente. No entanto, para teores mais elevados de substituição, de CIM/30% e CIM/40%, também foram observados valores máximos (em °C/min) de 0,18 e de 0,16, respectivamente, para o tempo de 10,75 h.

Baseado em experimento realizado por Hachmi *et al.* (1990), verificou-se que o índice de compatibilidade (I_c) utilizado pelos autores para avaliar a interação entre partículas de madeira e o cimento, adaptado no presente estudo para o RIP, aumentou com o aumento no teor de substituição do cimento. Porém, não se observou diferença significativa para o

teor de CIM/10% de substituição em relação à pasta referência (0%), o que permite concluir que esse teor de substituição mostra pouca influência na inibição das reações de hidratação da pasta.

Tabela 14. Efeito dos teores de substituição do cimento pelo RIP (em %) nos parâmetros da curva de hidratação.

Teor de substituição (%)	Tempo (h)	Temperatura máxima (°C)	%Tempo	% Temperatura	inclinação máxima °C/min	Ic
0	10,75	58,2	-	-	0,3	-
CIM/10	11,08	57,3	3,1	-1,55	0,26	0,01
CIM/20	11,37	50,1	5,8	-13,92	0,18	0,32
CIM/30	11,46	47,3	6,6	-18,73	0,18	0,49
CIM/40	12,42	48,6	15,5	-16,49	0,12	1,54

Cumpramos esclarecer que tal análise da cinética da hidratação das pastas carece de um maior rigor científico, pois o sistema utilizado no presente experimento não pode ser considerado como se sendo perfeitamente adiabático. No entanto, a despeito da falta de um controle efetivo do isolamento térmico dos recipientes que contém as misturas, mesmo assim a praticidade do experimento permite antever o comportamento de misturas cimentícias, ao se modificar a pasta controle pela adição de materiais que teriam supostamente atividades pozolânicas, como é o caso do RIP.

5.2.2 Determinação do tempo de pega

Mehta (1987) afirmou que a adição de pozolana natural ao cimento Portland retarda o tempo de pega, devido à diluição do cimento Portland (sendo este o elemento mais ativo). Garcia *et al.* (2008) e Neves Junior *et al.* (2013) verificaram que a relação água/cimento também pode influenciar no tempo de pega da pasta de cimento. O aumento da relação a/c retarda a pega e, conseqüentemente, o processo de endurecimento. Para eliminar esta variável foi fixado o valor da relação a/c de 0,50, conforme metodologia proposta por Higashiyama *et al.* (2012) e Higashiyama *et al.* (2013). Os resultados do ensaio de Vicat indicaram que houve um retardo no início de pega e no fim de pega para todos os teores de substituição do cimento por RIP em relação à pasta referência, conforme a Tabela 15. Na Figura 31, verificou-se que todas as curvas de resistência à penetração se deslocaram

para direita, em relação à pasta controle, representando o retardo no tempo decorrido de início e fim de pega, e indicando, provavelmente, que o RIP apresenta características de um material pozolânico.

Tabela 15. Tempos de início e fim de pega.

Traço	Início de pega (min)	% diferença Início de pega	Fim de pega (min)	% diferença Fim de pega	Diferença dos tempos de pega (min)
Referência	280	-	460	-	180
10%	330	17,86	475	3,26	145
20%	330	17,86	560	21,74	230
30%	347	23,93	581	26,30	234
40%	352	25,71	645	40,22	293

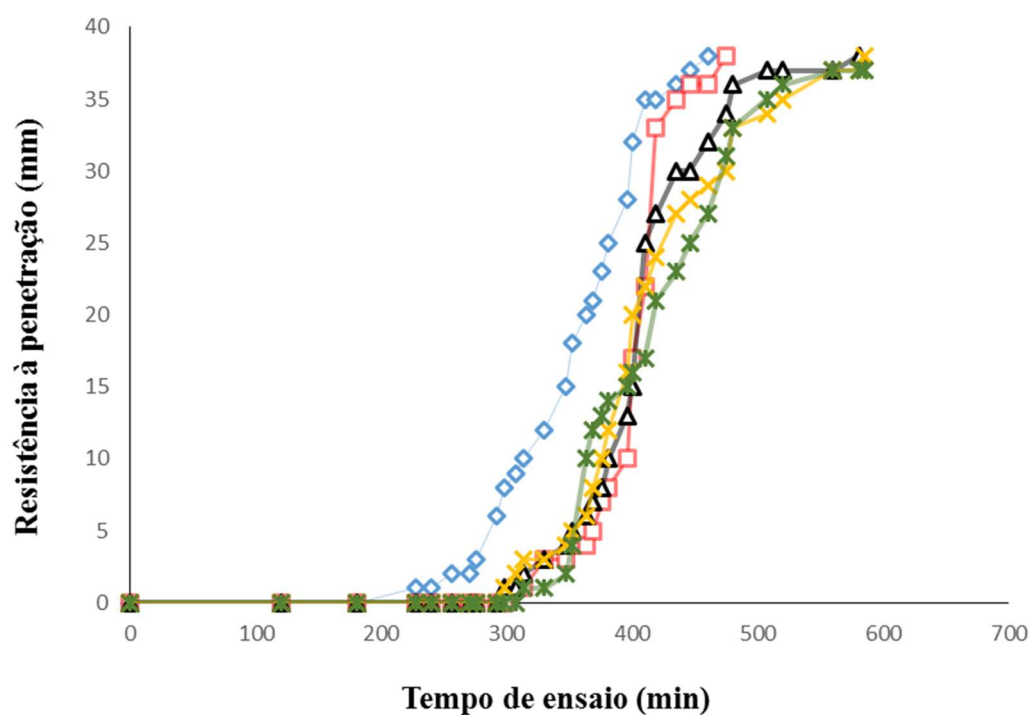


Figura 31. Resistência à penetração da pasta.

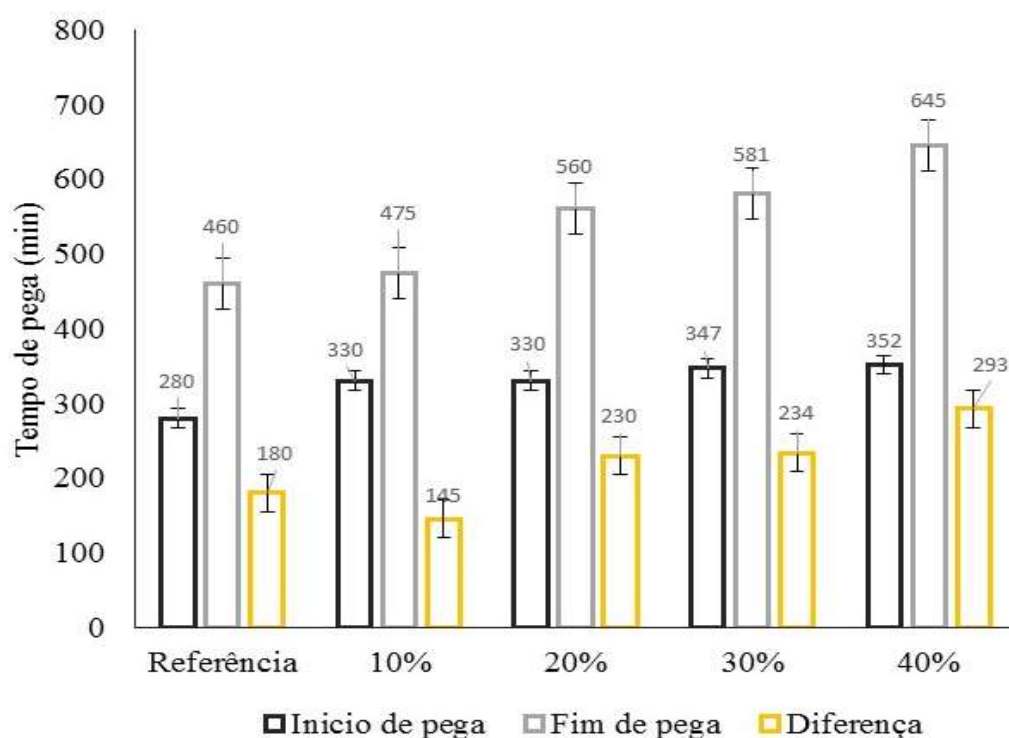


Figura 32. Tempo de início e fim de pega em função do teor de substituição.

Em comparação com a pasta referência (Figura 32), observou-se que houve um retardo no tempo decorrido de início de pega, entre 17,8% a 25,71%. Para o tempo decorrido de fim de pega, o teor de CIM/10% de substituição apresentou um valor igual a 3,26%, enquanto que para os teores de CIM/20%, CIM/30% e CIM/40%, os aumentos foram de 21,74%, 26,31% e 40,21%, respectivamente. Conclui-se que o CIM/10% foi aquele que afetou em menor grau a hidratação da pasta.

Neves Junior (2013) identificou que com o aumento das relações água-cimento de 0,35 para 0,85 houve também o aumento dos tempos de início e fim de pega, no processo de cura.

5.2.3 Termogravimetria

As análises de termogravimetria foram realizadas para pastas com RIP produzidas com hidróxido de cálcio (CH) nos teores de 50% e 70%, e com cimento CPV-ARI, nos teores de CIM/10%, CIM/20%, CIM/30% e CIM/40% de substituição, nas idades de 28, 91 e 121 dias, para todos os teores. O objetivo foi o de avaliar a reatividade do RIP por meio da determinação do CH consumido, para cada uma dessas pastas, de acordo com a metodologia proposta na seção 4.2.3.3.

5.2.3.1 Pastas do sistema CH e RIP

As pastas produzidas com Ca(OH)_2 apresentaram os teores de consumo de CH, conforme a Tabela 16 e a Figura 33. Nas pastas produzidas com CH, o teor de 50:50 apresentou um consumo de CH superior ao teor 70:30. Isto pode ser explicado pela maior quantidade de RIP disponível para reação com CH. Em ambos os casos, os valores de consumo de CH (%) foram inferiores (entre 44,91% a 63,41%) aos resultados obtidos com cinza de cana-de-açúcar (entre 50,71 a 91,71%), de acordo com Rodrigues (2012).

Moraes (2015), em seu estudo com cinzas de folha de cana-de-açúcar, identificou que o que o hidróxido de cálcio já havia sido totalmente consumido aos 3 dias de cura. No caso do teor 50:50, o consumo de CH estabilizou-se após 91 dias, denotando a característica de material pozolânico.

Tabela 16. CH consumido (%) das pastas CH/RIP.

Pastas (CH : RIP)	Idades de cura (dias)		
	28	91	121
	CH consumido (%)		
70:30	44,91	42,74	48,26
50:50	54,20	64,32	63,41

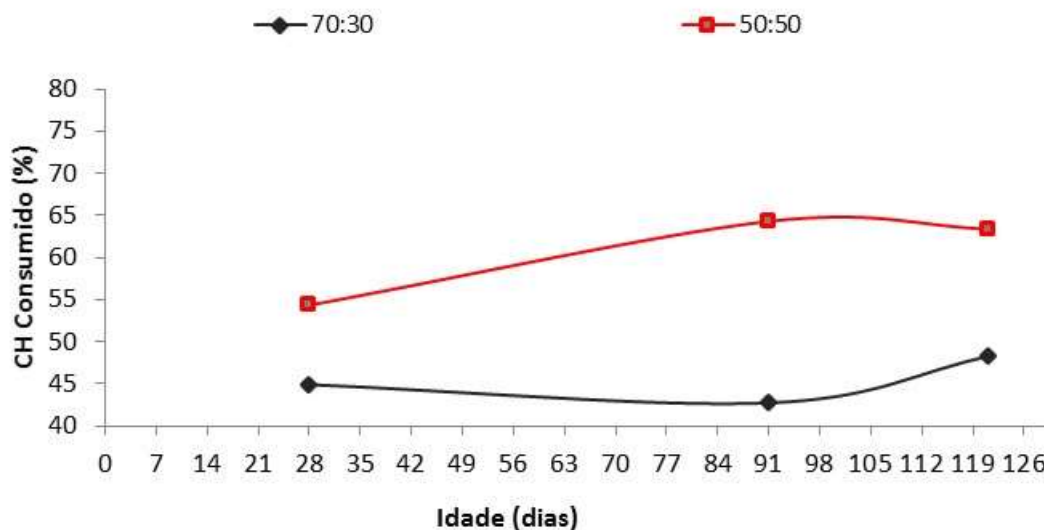


Figura 33. Evolução do consumo de CH nas pastas de CH/ RIP em função da idade.

A quantidade de água combinada que se encontra associada aos produtos de hidratação, em porcentagem, é um parâmetro muito útil na análise termogravimétrica. A determinação dessa porcentagem é calculada com base na porcentagem de perda de massa total subtraída da porcentagem de perda de água entre 400 °C -600 °C, conforme Medina (2011). As porcentagens de água combinada dos produtos formados nas pastas de CH/ RIP estão apresentadas na Figura 34.

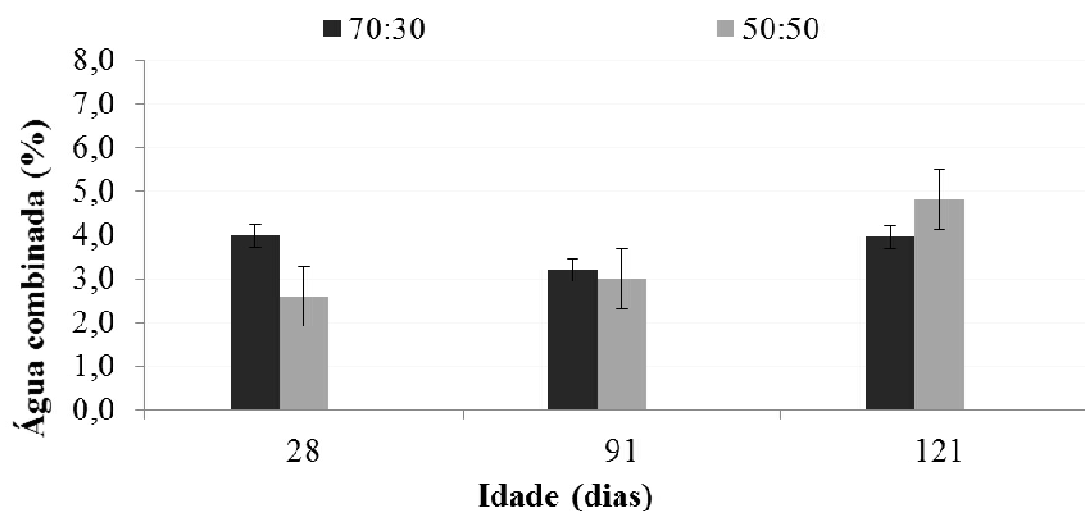


Figura 34. Porcentagens de água combinada dos produtos hidratados das pastas de CH/ RIP em função das idades de cura.

Observa-se que para o teor de 50:50, à medida que aumenta a idade de cura são formadas maiores quantidades de produtos de hidratação e, conseqüentemente, ocorrendo um aumento da porcentagem de água combinada.

5.2.3.2 Pastas do sistema Cimento e RIP

A Tabela 17 e a Figura 35 apresentam as porcentagens de CH consumidas para as pastas CIM/RIP.

Tabela 17. CH consumido (%) das pastas CIM/RIP em diferentes idades de cura.

Pastas	Idades de cura (dias)		
	28	91	121
	CH consumido (%)		
CIM/10%	13,98	16,65	16,81
CIM/20%	*	12,83	13,94
CIM/30%	5,06	9,54	10,28
CIM/40%	6,04	6,25	8,18

*erro na coleta dos dados

Observou-se que conforme aumento do teor de RIP nas pastas com cimento diminuiu-se o CH consumido, ao contrário do que ocorreu com as pastas com CH. Provavelmente devido à reação mais lenta do RIP com o cimento, já nas pastas com CH, a quantidade de Ca(OH)_2 disponível no sistema seja mais elevada. Conclui-se que o teor CIM/10% foi o que apresentou melhor resultado para o consumo de CH(%).

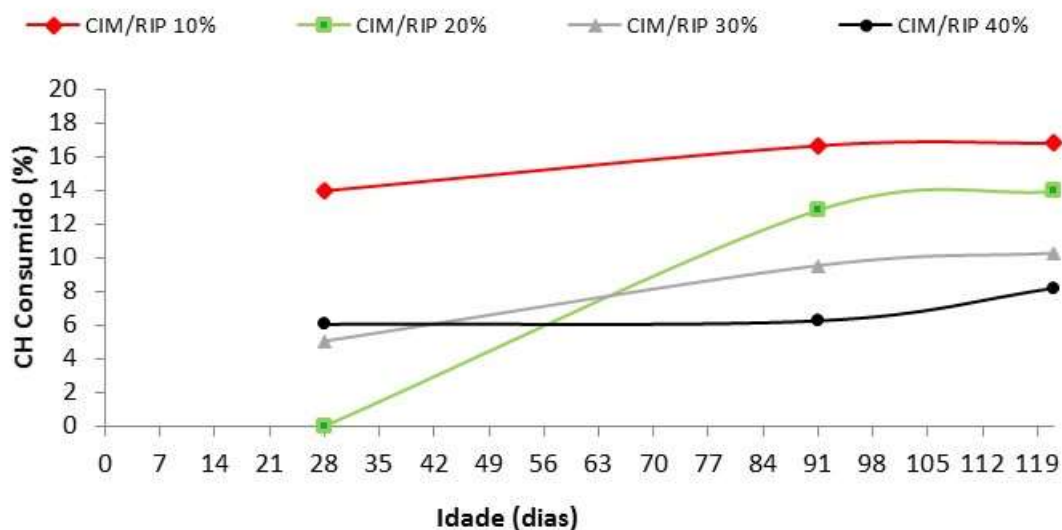


Figura 35. Evolução do consumo de CH nas pastas de CIM/ RIP em função da idade.

A Figura 36 apresenta as porcentagens de água combinada dos produtos de hidratação formados dos sistemas CIM/RIP. Os resultados demonstram que com o aumento do teor de substituição diminui-se a porcentagem de água combinada. O teor de CIM/10%, que já havia apresentado maior consumo de CH, também apresentou a maior porcentagem de água combinada. Uma explicação para o consumo de CH (%) nas pastas ser tão baixo encontra-se no fato de que o RIP, como um material pozolânico, influenciou na densidade de empacotamento do sistema, alterando, assim, a quantidade de água de preenchimento; sendo necessária mais água para favorecer a formação de produtos hidratados.

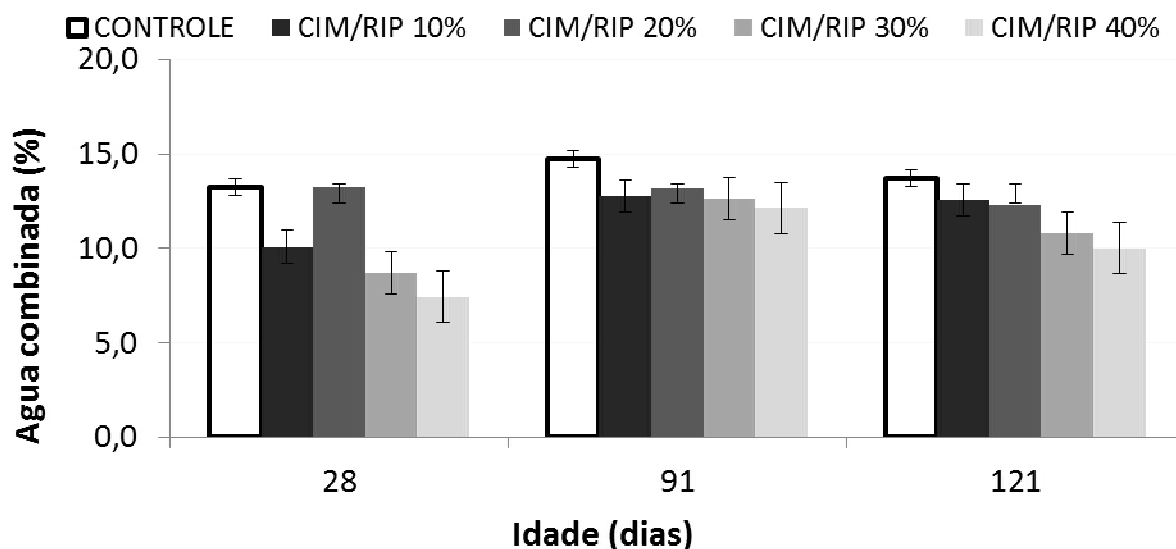


Figura 36. Porcentagens de água combinada dos produtos hidratados das pastas controle e pastas CIM/RIP em função das idades de cura.

5.2.4 Difração de Raios - X das pastas

A Figura 37 apresenta os difratogramas das pastas obtidos aos 28 dias de idade de cura, verificando-se que para os picos de portlandita (ângulos de Bragg (2 θ): 18,06°, 34,14° e 50,80°), a somatória das áreas dos principais picos de portlandita das pastas com os teores de CIM/10%, CIM/20%, CIM/30% e CIM/40% foram menores em relação ao controle, com queda no valor das áreas de 8,60%, 11,94%, 30,65% e 44,73%, respectivamente. Ou seja, houve um maior consumo de CH nessas pastas. Esses resultados contrariam os ensaios de TG, no qual se observou que com o aumento do teor de substituição diminuiu o consumo de CH.

Nas análises dos picos de alita, nos ângulos de Bragg (2 θ): 29,46 e 47,5 a somatória das áreas dos principais picos de alita das pastas com os teores de CIM/10%, CIM/20%, CIM/30% e CIM/40% foram menores em relação ao controle, com valores de queda de área de 9,83%, 10,14%, 11,78% e 16,59%, respectivamente. Portanto, houve provavelmente um maior consumo de CH nessas pastas.

O pico do quartzo pode ser observado nos ângulos de Bragg (2 θ): 26,68, apenas nas pastas com RIP, devido à presença dessa fase na composição do RIP. Observa-se que com o aumento do teor de substituição aumentou a concentração de SiO₂.

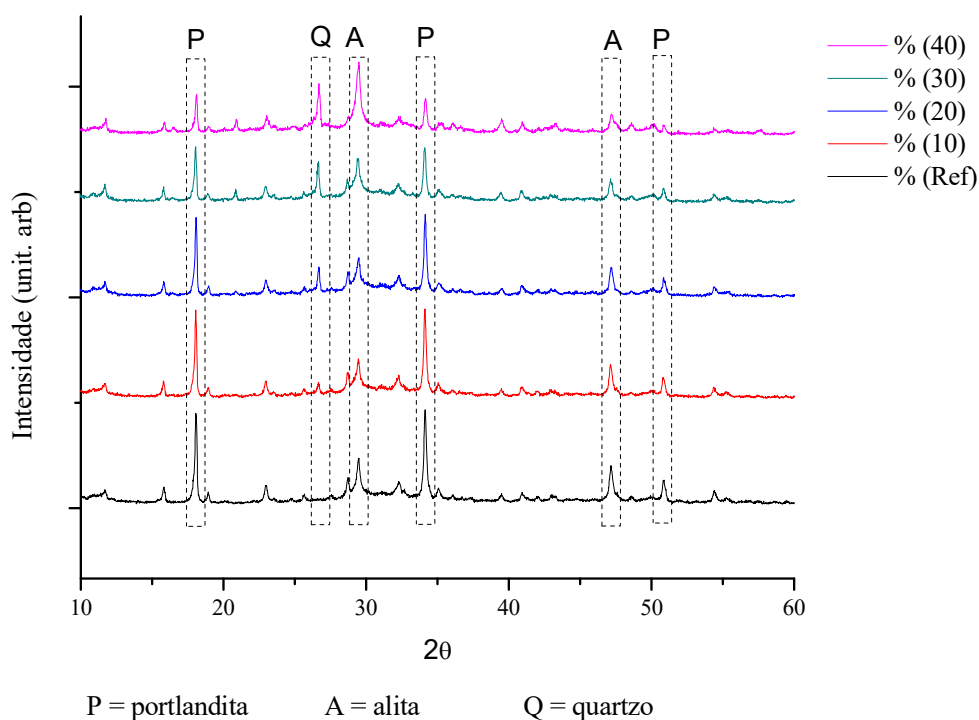


Figura 37. Difrátogramas de raios-X das pastas controle e CIM/RIP aos 28 dias de cura.

Os difratogramas das pastas analisadas aos 365 dias de idade estão apresentados na Figura 38. Os picos de portlandita para todos os teores de substituição (10%, 20%, 30% e 40%) apresentaram menores valores de área, com quedas de 12,05%, 37,87%, 45,14%, e 55,22%, respectivamente, em relação à pasta controle. Essa diminuição das áreas dos picos de CH provavelmente esteja associada ao consumo dessa fase pelo RIP e à formação dos produtos hidratados.

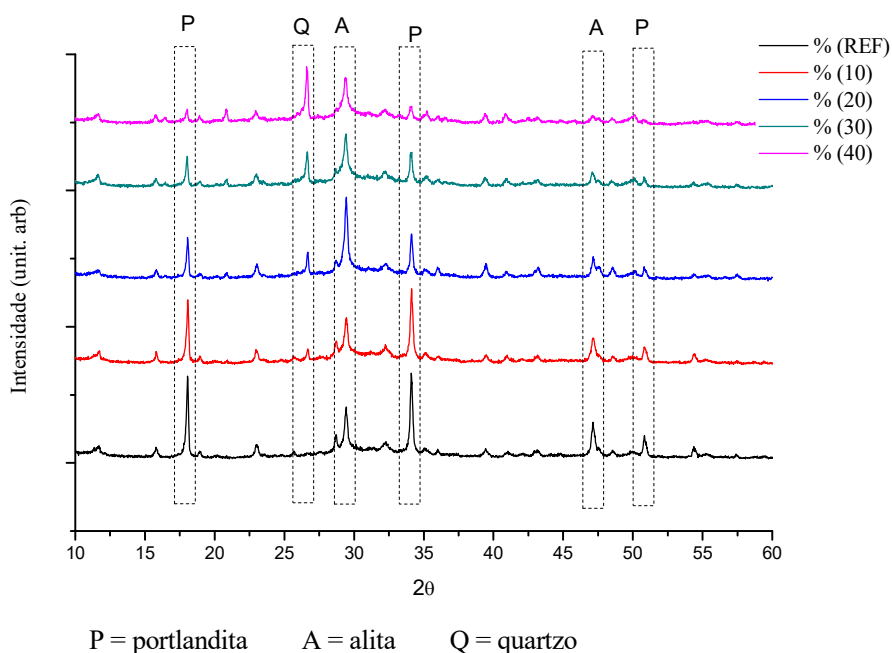


Figura 38. Difratomogramas de raios - X das pastas controle e CIM/RIP aos 365 dias de cura.

Os difratogramas das pastas analisadas aos 365 dias de idade para os picos de alita apresentam menores valores de área, com quedas de 4,38%, 5,87%, 15,09%, para os teores de CIM/10%, CIM30% e CIM40%, respectivamente, com a relação à pasta controle. Essa diminuição das áreas dos picos de CH provavelmente esteja associada ao consumo dessa fase pelo RIP e à formação dos produtos hidratados. Para o teor de CIM/20% houve um aumento de 13,10% em relação à pasta controle.

Comparando-se os resultados de DRX das pastas aos 28 dias (Tabela 18) e 365 dias (Tabela 19) observa-se a presença de C_2S nas pastas de 365 dias, o que não era esperado. Durante o processo de homogeneização da mistura, como as partículas do RIP são de tamanho similar às do cimento, pode ter ocorrido uma sobreposição das partículas causando uma ineficiência de dispersão das partículas.

Também se observou que o ensaio de DRX detectou, aos 28 dias e aos 365 dias, a presença de CSH para todas as pastas, mas a complexidade da estrutura gel do CSH e o polimorfismo da alita dificultou a identificação precisa dessas fases e, por consequência, a correta determinação dos valores das áreas dos picos nos difratogramas. O RIP sendo um produto pozzolânico, o CSH dificilmente seria detectável por análise de raios - X, devido ao

seu baixo grau de cristalinidade. Bakolas *et al.* (2008), em seu estudo sobre avaliação da pozolanicidade de pó cerâmico proveniente de tijolos em pasta de cimento, mencionaram a presença de CSH, nos picos ângulos de Bragg (2θ): 28-31°, mas também relataram a dificuldade de identificar o CSH nos difratogramas.

Tabela 18. Minerais identificados pelo ensaio de DRX aos 28 dias.

28 dias	CH	CaCO ₃	C ₂ S	CSH	C ₆ AS ₃ H ₃₂	MgO	SiO ₂	óxido aluminato de cálcio e ferro	óxido aluminato de cálcio carbonatado	CaMg (CO ₃) ₂	2CaSO ₄ .H ₂ O
Ref	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
10%	X	X		X	X		X	X	X		
20%	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
30%	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
40%	X	X	X	X	X		X	X	X		X

- Não detectado

Tabela 19. Minerais identificados pelo ensaio de DRX aos 365 dias.

365 dias	CH	CaCO ₃	C ₂ S	CSH	C ₆ AS ₃ H ₃₂	SiO ₂	óxido aluminato de cálcio e ferro	óxido aluminato de cálcio carbonat	CaMg (CO ₃) ₂	Feldspato	mica	CaSO ₄	C ₄ AH ₁₃	mulita
Ref	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x		
10%	x	x	x	x	x			x				x	x	
20%	x	x	x	x	x	x		x					x	
30%	x	x	x	x	x	x		x						x
40%	x	x	x	x	x	x		x						x

- Não detectado

5.2.5 Compressão simples das pastas

Os ensaios mecânicos foram aplicados às pastas referência e naquelas com substituição do cimento pelo RIP, nas idades de 7, 28, 91 e 121 dias. Na análise estatística a variável dependente foi a resistência à compressão simples e os fatores avaliados foram os teores de RIP nas pastas (referência, 10%, 20%, 30% e 40%) e as idades de cura (7, 28, 91 e 121 dias).

A análise de variância (ANOVA) indicou que os fatores Teor e Idade interferiram significativamente no resultado da compressão simples das pastas avaliadas.

A comparação dos teores (A: Teor), através da ANOVA, o *p*-value foi igual a 0,0001, ou seja, inferior a 0,05 (sendo estatisticamente significativo) ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste LSD, ou seja, o teor de substituição influenciou nos resultados. Segundo a comparação das idades (B: Idade), o *p*-value foi igual a 0,0000, ou seja, inferior a 0,05 (sendo estatisticamente significativo) ao nível de 95% de probabilidade, pelo teste LSD, ou seja, a idade influenciou nos resultados. No entanto, a interação entre os dois fatores não se mostrou significativa na propriedade avaliada, como mostra a Tabela 20.

Tabela 20. Análise de Variância (ANOVA) para compressão simples - Tipo III Soma dos quadrados.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Teor	1491,12	4	372,78	6,77	0,0001
B:Idade	2097,09	3	699,031	12,70	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1009,48	12	84,1232	1,53	0,1263
RESIDUAL	5502,87	100	55,0287		
TOTAL (CORRECTED)	10100,6	119			

Todos os F-ratios baseiam-se no erro quadrático médio residual

Pela análise de *Multiple Range Test*, conforme Tabela A1 do anexo A, observa-se que os grupos identificados por "X" do fator teor de substituição (razão cimento: RIP) estão pareados para os teores de 0% (referência) e 10% indicando que não houve diferença

estatística. Entretanto quando se faz a análise sem o valor de referência (0%) verifica-se que os grupos também estão pareados para os teores 10%, 20% e 30%, indicando que não houve diferença significativa entre estes teores.

Da mesma forma, a análise gráfica (Figura 39) mostra-se que o teor ideal de *substituição* do cimento pelo RIP foi de 10%, sendo a resistência à compressão apenas 9,84% inferior em relação à pasta referência. Pode-se observar que a resistência à compressão das pastas varia inversamente com o aumento no teor de substituição do cimento pelo RIP.

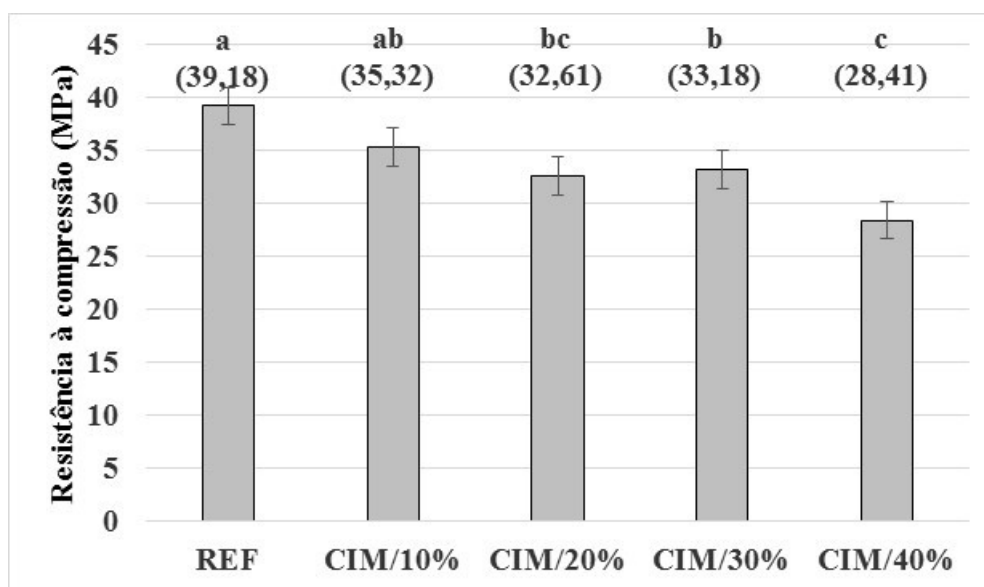


Figura 39. Resistência à compressão simples em função do teor de substituição de cimento por RIP.

*Médias seguidas da mesma letra não diferem ao nível de 95% de probabilidade estatística pelo teste LSD.

Beraldo *et al.* (2013) realizaram estudos aplicados a pastas e argamassas, com substituição parcial do cimento Portland por RIP. Os autores concluíram que o teor ideal de substituição foi de 10%, pois não houve diferença estatística significativa para os resultados de resistência mecânica em relação ao traço-referência.

Higashiyama *et al.* (2012), em seu estudo com argamassa, concluíram que a resistência à compressão foi mais elevada quando da substituição de 30% do cimento pelo RIP. No entanto, cumpre esclarecer que além de a finura do RIP mostrar um papel significativo na cinética da reação e no consequente comportamento mecânico do material, a inclusão também de agregado miúdo altera a estrutura da matriz.

Para o fator *idade* pode-se observar que na idade de 7 dias a resistência à compressão foi estatisticamente diferente daqueles referentes às idades de 28, 91 e 121 dias. Porém, os valores mais elevados de resistência à compressão foram obtidos nas idades mais avançadas (91 e 121 dias), não havendo, no entanto, diferenças estatisticamente significativas entre elas. Isto pode ser explicado devido à utilização do RIP, que por apresentar características de material pozolânico, as resistências mecânicas finais das pastas ocorrem para idades mais avançadas, conforme Figura 40. Uma explicação para tal fato pode estar relacionada à eficiência de moagem (finura) que foi realizada para o RIP, permitindo que o mesmo apresentasse características pozolânicas mais efetivas.

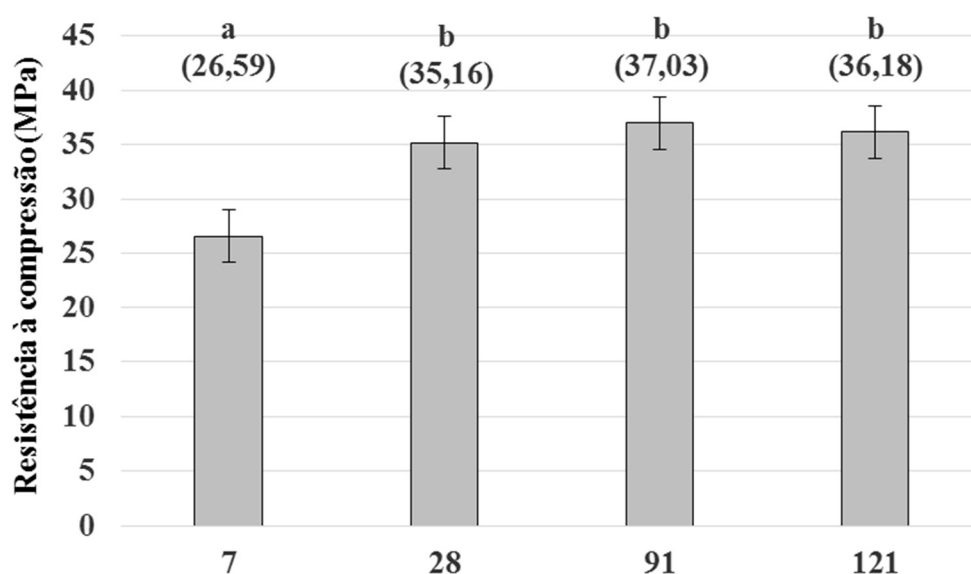


Figura 40. Valores das médias de resistência à compressão simples em função da idade de cura.

*Médias seguidas da mesma letra não diferem ao nível de 95% de probabilidade estatística pelo teste LSD.

Através da análise *Multiple Range Test*, pode-se observar que os grupos identificados por “X” não estão pareados apenas para idades de 7 dias. Pode-se então concluir que os valores da resistência à compressão não são estatisticamente diferentes para demais idades, conforme Tabela A2, do anexo A.

Raval *et al.* (2013) verificaram que a resistência à compressão do resíduo de pó cerâmico proveniente do polimento de indústrias cerâmicas aumentou com as idades mais

avançadas. O aumento da resistência à compressão foi de 29%, de 23,55 MPa (7 dias) para 30,40 MPa (28 dias), porém essa propriedade diminuiu com o aumento no teor de substituição.

5.2.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado para as pastas aos 28 dias de idade. Essa técnica fornece a distribuição de tamanho de poros da amostra, por meio da quantidade de mercúrio introduzida no material em função da pressão de intrusão, e o correspondente tamanho de poro.

Com os resultados obtidos, os poros foram divididos em quatro faixas de diâmetro que afetam as diferentes propriedades das pastas de cimento (Tabela 21), conforme classificação sugerida por Silva *et al.* (2001).

Tabela 21. Classificação do tamanho de poros.

Designação	Faixa	Diâmetro de poro	Propriedades afetadas
Porosidade das fases hidratadas ("gel")	1	< 10 nm	Retração e fluência
Capilares médios	2	10 - 50 nm	Resistência, permeabilidade, fluência e retração a altas umidade relativas
Capilares grandes	3	50 nm - 1 µm	Resistência e permeabilidade
Capilares grandes e ar incorporado	4	> 1 µm	Resistência

Fonte: Silva *et al.* (2001).

De um modo geral, verifica-se através da Figura 41, que todas as pastas contêm poros capilares médios (entre 0,01 µm e 0,1 µm) e capilares grandes (entre 0,1 µm e 1 µm). As pastas com teores de 30% e 40% de RIP apresentaram maior volume de poros capilares grandes com ar incorporado (>1 µm), o que poderia influenciar nos resultados de resistência à compressão.

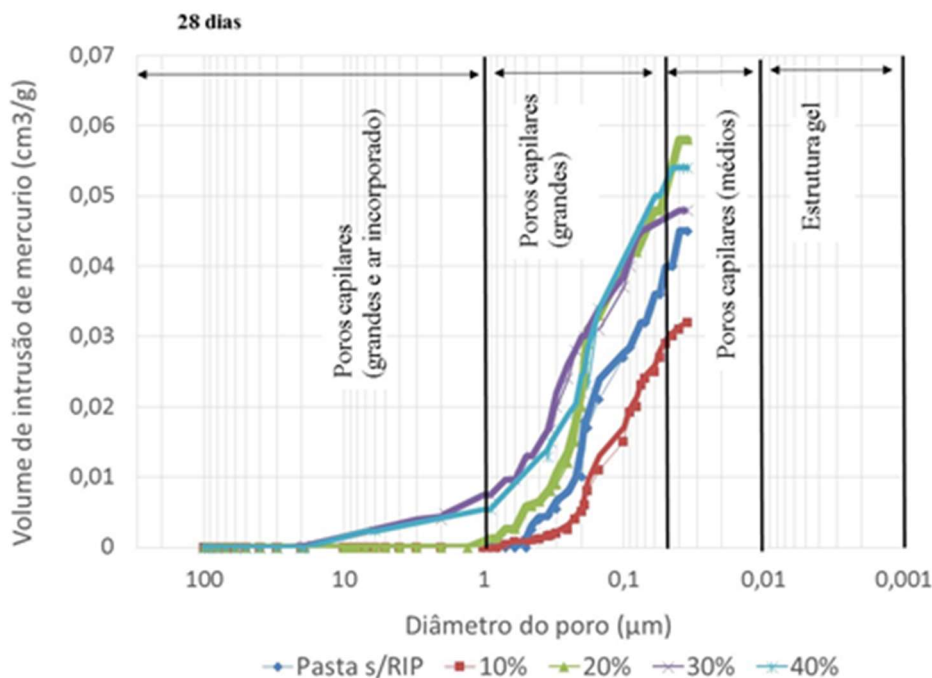


Figura 41. Distribuição dos tamanhos dos poros aos 28 dias.

Não foi possível observar a distribuição de poros na estrutural gel (faixa 1), o que poderia auxiliar a relacionar com mais precisão, a formação de C-S-H dessas pastas com a eficiência de dispersão das partículas e, conseqüentemente, avaliar a maior densidade de empacotamento. A estrutura do material se torna mais densa e menos susceptível à fratura, quanto maior for a formação de C-S-H (MARTIRENA HERNANDEZ *et al.*, 1998).

Castro e Pandolfelli (2009) relataram que a densidade de empacotamento com menor porosidade pode ser obtida se os vazios existentes entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos por partículas menores do que os mesmos. Porém, caso sejam introduzidas partículas maiores do que os vazios existentes, essas promoverão o surgimento de novos vazios, levando a um aumento na porosidade e à redução da eficiência do empacotamento.

Nas pastas em estudo, a distribuição granulométrica similar dos insumos (RIP e o cimento CPV-ARI), pode ter interferido nos resultados de porosidade, favorecendo o estado de monodispersão. Segundo Oliveira (2013), na monodispersão, um sistema é constituído de partículas de um único tamanho, proporcionando um estado de densidade mínima.

Mesmo assim, o teor de CIM/10% apresentou menor porosidade, em relação às demais pastas e à pasta referência, o que indica que ocorreu um maior refinamento da microestrutura da mistura, o que possibilitou a diminuição da porosidade, conforme mostra a Figura 42.

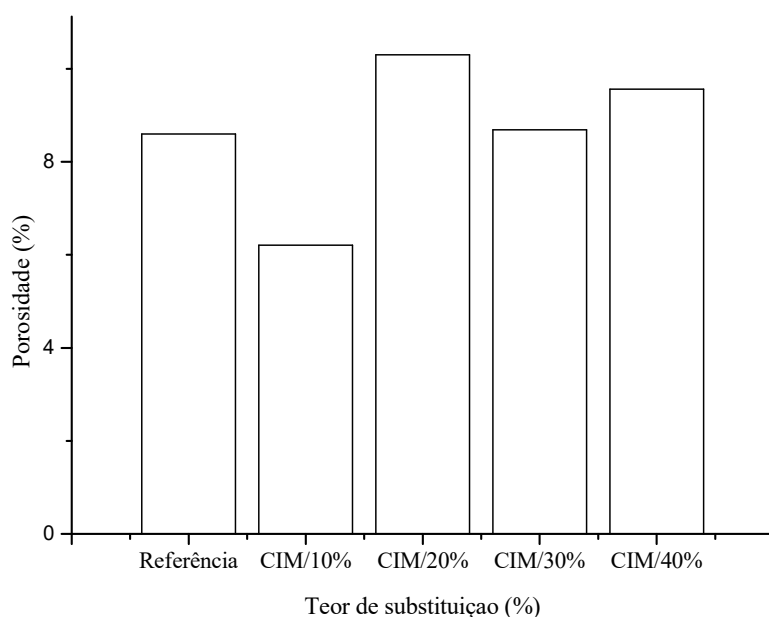


Figura 42. Porosidade das pastas (%) em função do teor de substituição.

Vejmelková *et al.* (2012), em seu estudo com resíduos de pisos cerâmicos, demonstraram que o teor de 10% de substituição do cimento não apresentou diferença estatística no resultado de porosimetria e, conseqüentemente, nos resultados de resistência à compressão, em relação ao concreto referência.

5.2.7 Ultrassom

Na Figura 43, pode ser observada a variação da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) em função da idade e do teor de substituição do cimento pelo RIP. De uma forma geral, os resultados obtidos permitem destacar que a magnitude da VPU se reduziu à medida que o teor de substituição do cimento por RIP aumentou; apenas para idade de 28 dias é que se observou uma aparente discrepância, pois a diferença entre os valores não se mostrou significativa. Por outro lado, quando se avalia o efeito da idade, também se pode observar que para essa mesma idade (28 dias), ocorreu uma leve inversão na curva, pois a mesma teoricamente deveria situar-se entre aquelas relativas às idades de 7 e de 91 dias. Parte dessa explicação refere-se à forma segundo a qual foi apresentado o gráfico, pois se fosse adotada a origem em “0”, as curvas seriam muito mais próximas e essa aparente distorção se tornaria imperceptível.

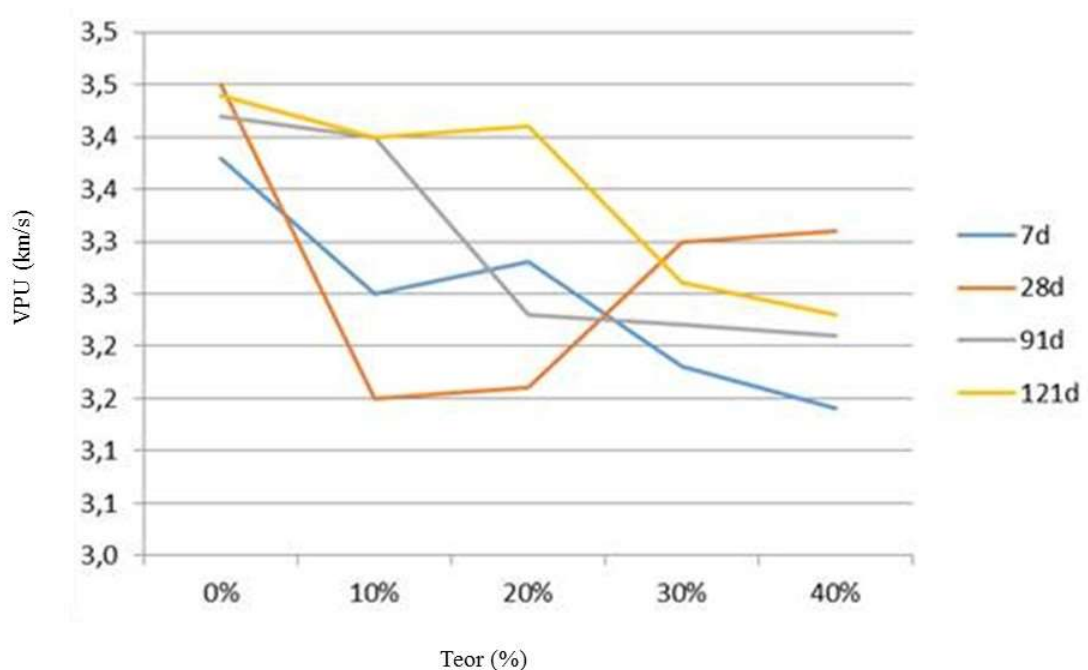


Figura 43. Velocidade do pulso ultrassônico (VPU) em função da idade (dias) e do teor de substituição de cimento por RIP (em %).

5.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e espectroscopia de Raios - X por dispersão de energia EDS nas pastas de cimento e RIP aos 28 dias

5.2.8.1 Pasta de cimento sem RIP

Analisando-se a imagem da Figura 44, com resolução de aumento de 15.000x, observa-se que a pasta de cimento sem RIP (referência), com idade de 28 dias, mostra a formação de cristais de monossulfoaluminato de cálcio ou C_4ASH_{18} (AFm) (3), stratlingita ou C_2ASH_8 (4). A análise de EDS mostra, no ponto 3, que a intensidade de cálcio foi superior à intensidade do silício (Tabela 22) indicando possivelmente presença de um cristal de alita, sendo o mesmo resultado encontrado por Souza *et al.* (2002). No ponto 4, foi identificado a stratlingita que ocorre na forma de finos folhetos, como descrito por Kwan *et al.* (1995) e Azerêdo (2012).



Figura 44. Pasta de cimento sem RIP com localização da (3) monossulfoaluminato de cálcio (AFm), (4) stratlingita.

Embora a resolução de aumento de 5.000X, seja diferente (Figura 45), o MEV mostra a formação da etringita (AFt), na posição 1, com formato acicular e a presença de enxofre, conforme Tabela 22. Esta identificação corrobora com resultados de DRX para pasta referência ou convencional.

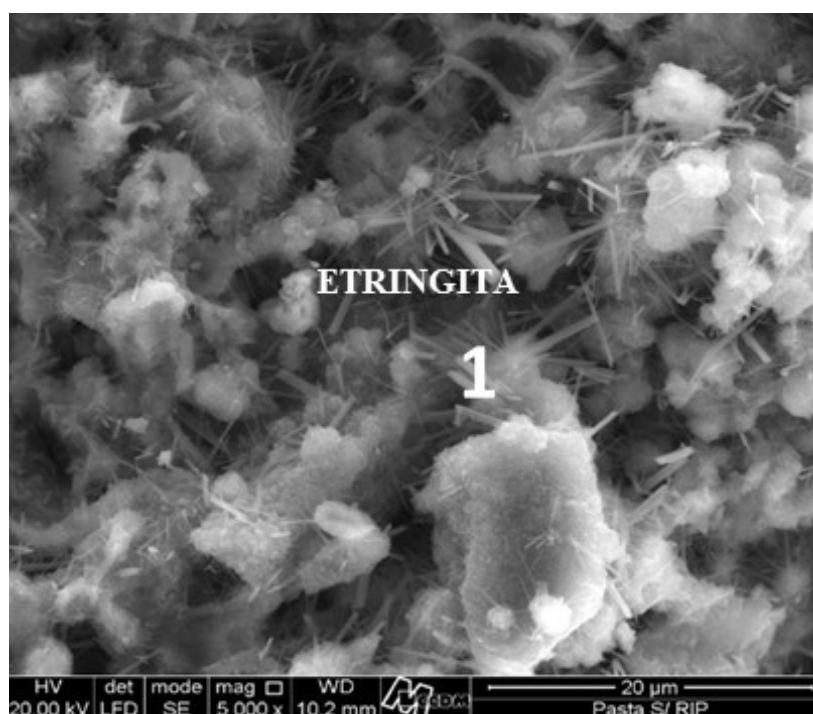


Figura 45. Pasta de cimento sem RIP com a presença de etringita.

Na Figura 46, o MEV mostra a formação da portlandita, no ponto 2, com formato de placas hexagonais finas, que aparecem nas primeiras idades. Na Tabela 22, observa-se grande concentração de cálcio.



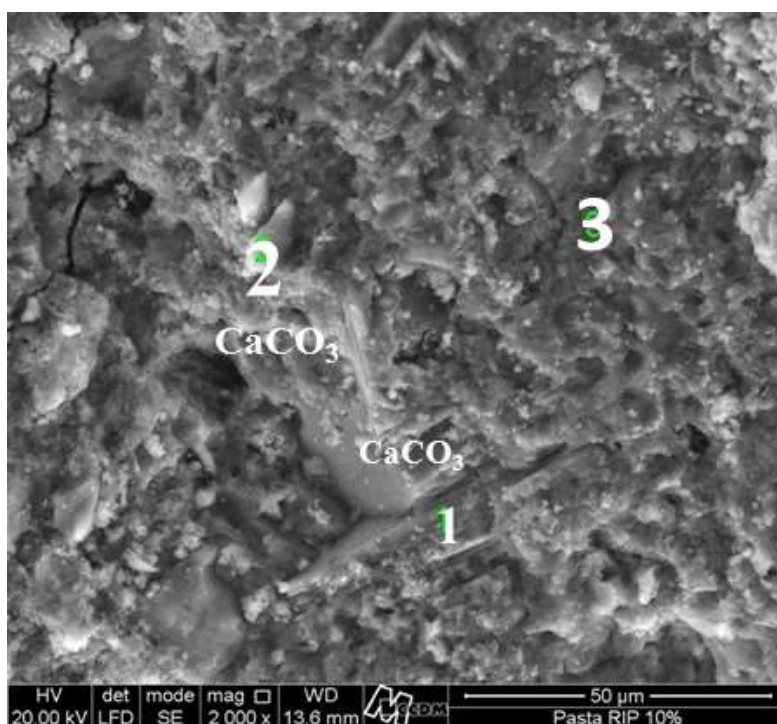
Figura 46. Pasta de cimento sem RIP mostrando a presença de CaCO_3 .

Tabela 22. EDS dos elementos químicos (% em peso) nas localizações 1, 2, 3 e 4.

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
Posição 1	0.98	54.65	0.19	0.55	1.74	5.94	0.06	2.27	-	0.93	31.80	-	0.91
Posição 2	6.93	54.70	0.34	0.20	0.43	2.29	-	-	-	0.69	33.98	-	0.44
Posição 3	1.57	46.68	0.30	0.98	1.71	4.42	-	-	-	1.64	40.24	0.27	2.18
Posição 4	4.93	43.95	0.35	1.82	1.13	4.68	-	-	0.07	2.29	39.15	0.18	1.45

Na Figura 47, mostra análises de MEV para pasta CIM/10%, com a resolução de aumento de 2.000X, foi possível detectar a calcita (CaCO_3), em forma de placas e também encontrado na análise de EDS (Tabela 23), nos pontos 1,2 e 3, a presença de cálcio (Ca). Segundo Costa *et al.* (2009), a morfologia de cristalização do CaCO_3 apresenta alguma diversidade, podendo esta fase surgir sob a forma de estruturas dendríticas facetadas ou em placas hexagonais. Estas identificações corroboram com resultados de DRX da pasta CIM/10%.

Analizando-se a imagem da Figura 48, com resolução de aumento de 7.000X, observa-se que a formação de cristais de stratlingita ou C_2ASH_8 em forma de folhetos. Azerêdo (2012) relatou que a stratlingita não aparece no DRX como produto de hidratação formado nas pastas.

Figura 47. MEV CIM/10%- Posição 1,2 e 3 (CaCO_3).

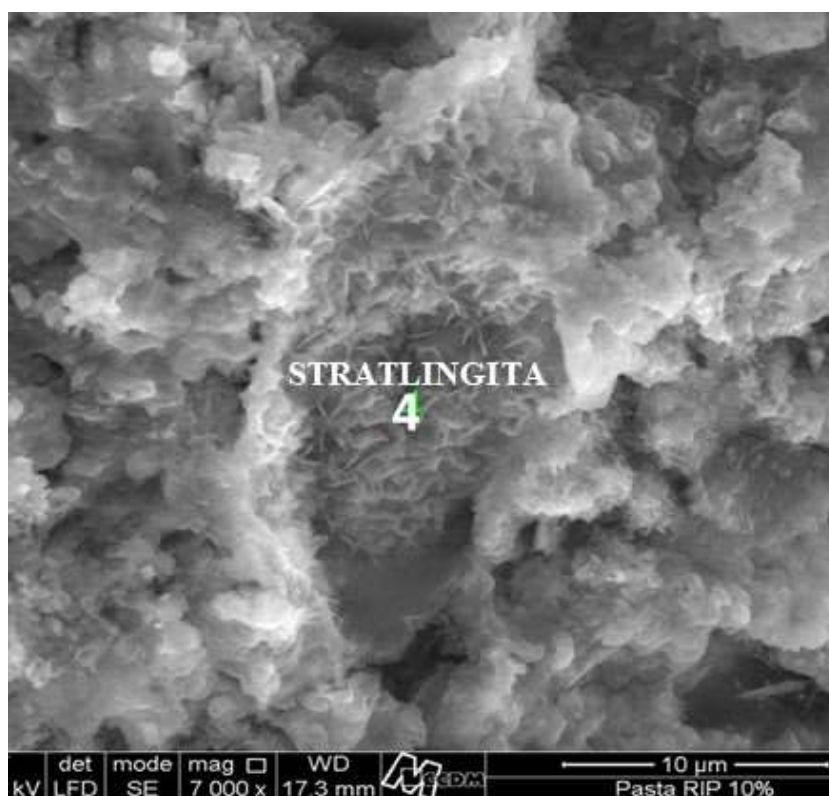


Figura 48. MEV CIM/10%- Posição 4 (stratlingita).

Tabela 23. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 1, 2, 3 e 4.

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Posição 1	4.56	49.18	0.28	0.33	0.61	2.74	-	0.18	1.37	40.19	0.09	0.47
Posição 2	2.73	56.49	0.78	0.23	8.36	16.49	0.10	0.04	2.51	11.48	0.17	0.61
Posição 3	5.17	50.22	0.66	0.67	1.34	6.38	0.04	0.15	3.40	30.81	0.10	1.06
Posição 4	5.48	55.82	0.58	1.57	1.40	7.42	0.14	0.25	3.45	22.80	0.15	0.95

Na Figura 49, apresentam-se as análises de MEV para pasta CIM/20%, com a resolução de aumento de 4.000X, foi possível detectar a calcita (CaCO_3), na posição 4, em forma de placas e também encontrada na análise de EDS (Tabela 24).

Observou-se a presença da stratlingita (C_2ASH_8), na posição 3, na forma de feixe de agulhas. Esta mesma fase foi observada por Mechti *et al.* (2012), nas micrografias de seus estudos com argila calcinada. Os autores relataram que esta fase é causada por uma maior fonte de quartzo na solução. As partículas finas de quartzo foram dissolvidas por uma solução alcalina e que contribuiu para a formação do C_2ASH_8 .

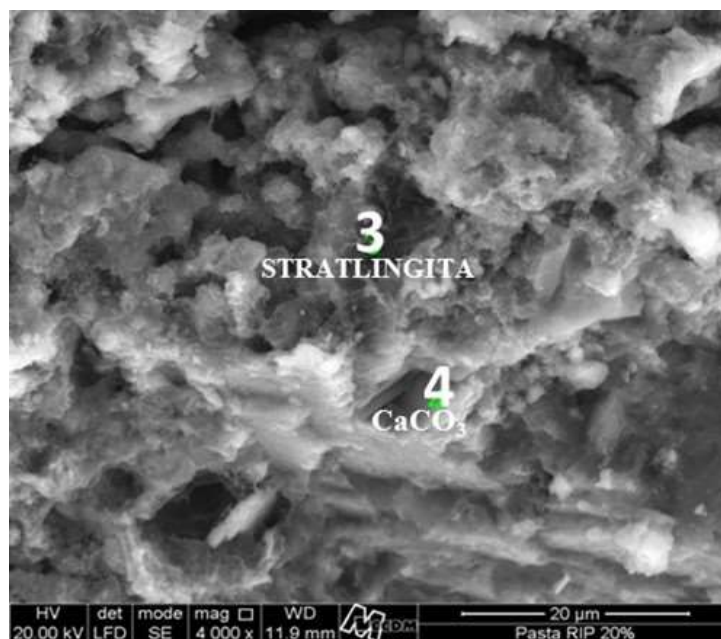


Figura 49. MEV CIM/20%- Posição 3 (Stratlingita), 4(CaCO₃).

Com a resolução de aumento de 20.000X, foi possível identificar a formação da etringita (AFt), na posição 5, com formato acicular e a presença de enxofre (1,57%), conforme Tabela 24.

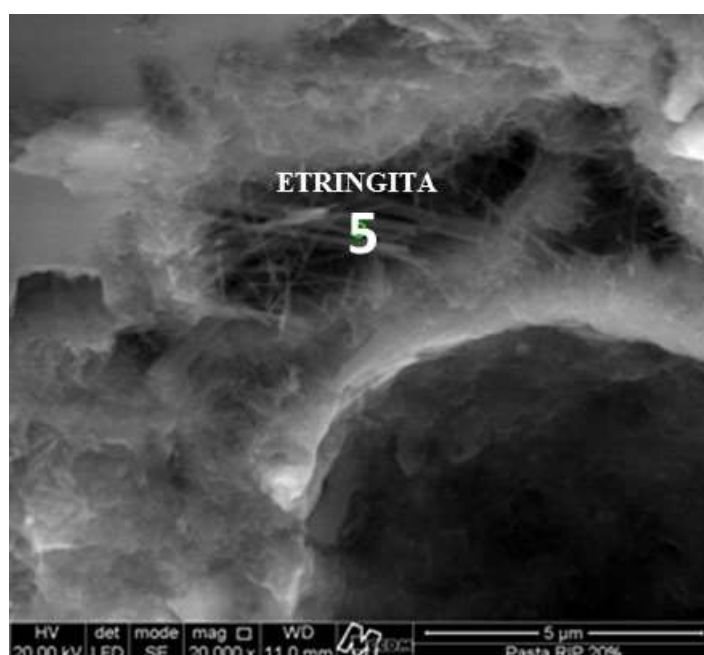


Figura 50. MEV CIM/20%- Posição 5 Etringita.

Tabela 24. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 3,4 e 5.

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Posição 3	5.60	43.03	0.46	0.91	3.21	9.86	-	0.21	0.02	5.26	29.73	0.23	0.11	1.36
Posição 4	7.34	50.52	0.35	0.37	0.86	2.87	-	0.08	0.04	1.72	35.29	0.05	0.03	0.48
Posição 5	0.17	50.94	0.22	0.49	1.85	5.87	0.07	1.57	0.02	5.26	29.73	0.23	0.11	1.36

Na Figura 51, apresentam-se análises de MEV para pasta CIM/30%, com a resolução de aumento de 5.000X, tendo sido possível detectar a presença da stratlingita na posição 1. Na posição 2, observa-se a presença de quartzo, Si (27,60%) e O (59,11%), corroborando com os picos observado nos ângulos de Bragg (2 θ): 26,68, devido à presença dessa fase na composição do RIP. Na posição 3, foi possível identificar a formação da etringita (AFt), na posição 3, com formato semelhante ao de agulhas e a presença de enxofre (1,61%), conforme Tabela (25),

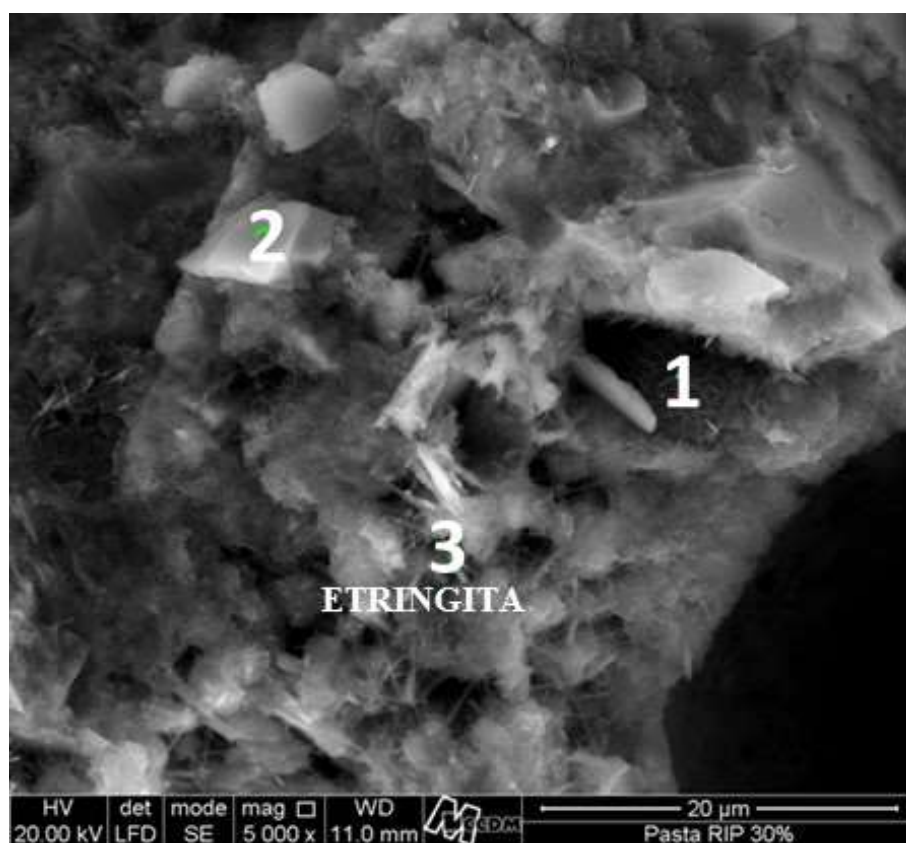
Figura 51. MEV CIM/30%- Posição 1 (stratilngita), 2 (SiO₂). Posição 3 (etringita).

Tabela 25. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 1, 2 e 3.

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Ba
Posição 1	0.63	44.58	0.47	1.14	2.15	9.85	1.61	3.16	34.98	1.44	-
Posição 2	0.65	59.11	0.45	0.30	1.63	27.60	0.38	0.98	8.60	0.30	-
Posição 3	1.44	49.24	0.64	0.55	4.57	14.89	2.18	2.58	23.08	0.83	-

Na Figura 52, apresenta-se a análise de MEV para a pasta CIM/40%, com a resolução de aumento de 3.000X, tendo sido possível detectar, na posição 8, o CaCO_3 , em forma de placas, com 39,63% em peso de Ca, segundo a análise de EDS (Tabela 26).

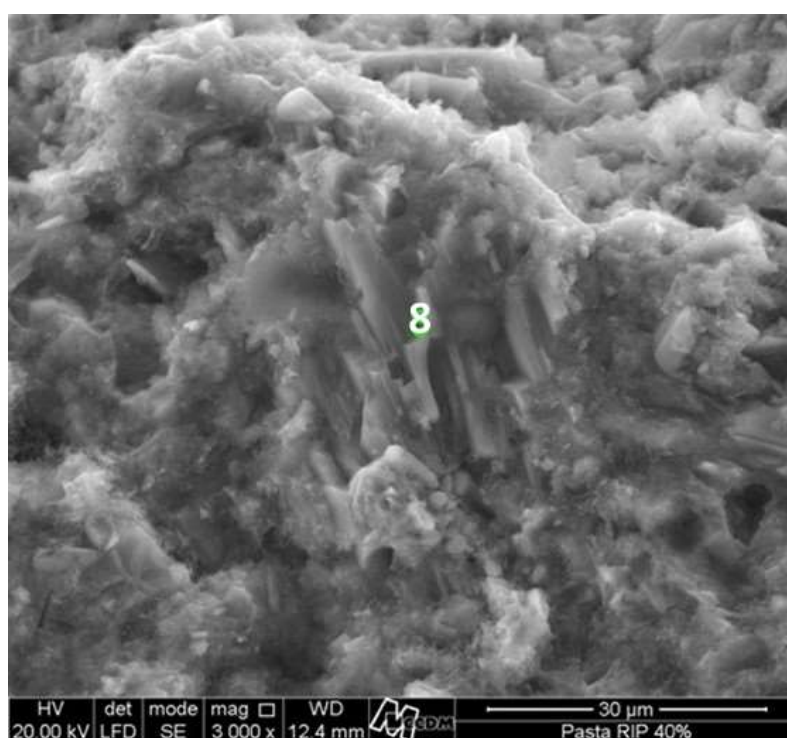
Figura 52. MEV CIM/40%- Posição 8(CaCO_3).

Tabela 26. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 8

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
Posição 8	0.22	52.00	0.12	0.32	1.43	4.68	-	0.72	-	0.37	39.63	-	0.51

Na Figura 53, apresenta-se a análise de MEV para pasta CIM/40%, com a resolução de aumento de 1.500X, tendo sido possível detectar nas posições 9 e 10, o CaCO_3 , com 27,28% e 23,63% em peso de Ca, respectivamente e 7,44% e 12,54% de Si, segundo a análise de EDS (Tabela 27). Na posição 11, foi possível identificar o C-S-H, com Si (18,19%) e Ca (21,14%). No ensaio de DRX também foram detectadas estas fases corroborando a identificação do MEV.

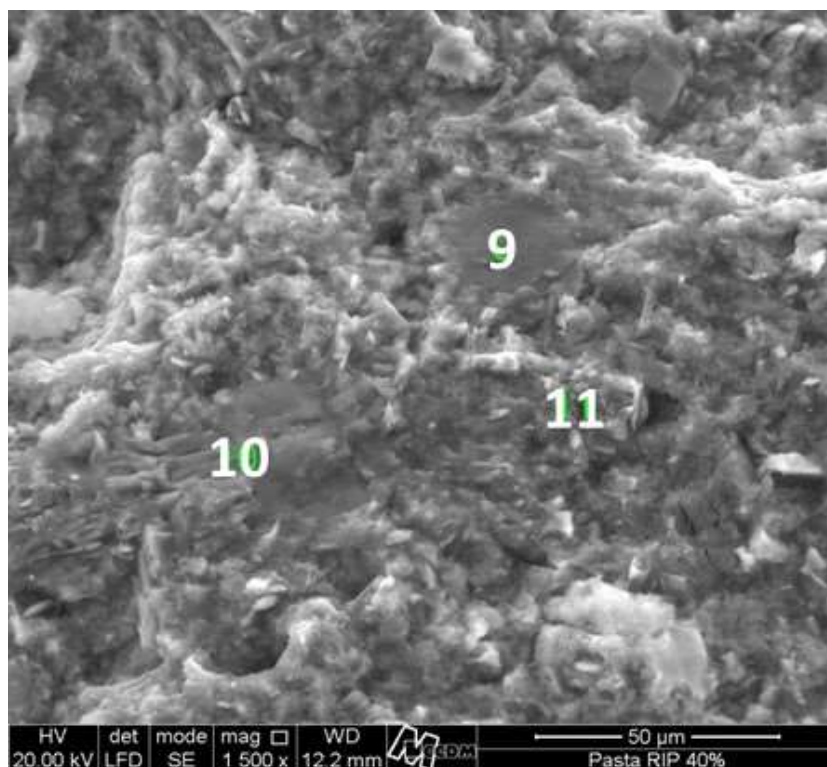


Figura 53. MEV CIM/40%- Posição 9,10 (CaCO_3) e 11 (C-S-H).

Tabela 27. EDS dos elementos químicos (% em peso) na localização 9, 10 e 11.

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
Posição 9	1.15	58.42	0.37	0.59	2.50	7.44	0.04	0.72	-	0.76	27.28	-	0.73
Posição 10	0.83	57.40	0.27	1.43	1.97	12.54	0.03	0.49	0.03	0.59	23.63	-	0.79
Posição 11	1.22	50.72	0.52	0.41	4.39	18.19	0.05	0.88	-	1.68	21.14	0.10	0.68

6 CONCLUSÕES

- A análise de FRX mostrou que o RIP possui característica de um material pozolânico, porém o teor de álcalis disponíveis em Na_2O encontrado foi de 4,30%, sendo superior ao valor de 1,5% permitido pelas normas. Pozolanas com valores acima do permitidos pelas normas poderiam favorecer o aparecimento de reações álcalis-agregado (RAA), podendo ter um efeito altamente prejudicial para artefatos de concreto.
- A análise de DRX mostrou que o RIP apresenta fases cristalinas, e também fase amorfa, de acordo com halo encontrado no difratograma nos ângulos de Bragg, 2θ , entre 20° e 30° , indicando a reatividade das amostras.
- Nos ensaios de termogravimetria observou-se que nas pastas com cimento quanto maior foi o teor de substituição, menor foi o consumo de CH nas pastas devido à reação lenta do RIP.
- A superfície específica do RIP ($1.433 \text{ cm}^2/\text{g}$) foi inferior às superfícies específicas da CCA ($8.374 \text{ cm}^2/\text{g}$) e do cimento Portland CPV-ARI ($6.432 \text{ cm}^2/\text{g}$) indicando que o material não é poroso.
- Nos resultados de calorimetria (semi-adiabático), os índices de compatibilidade química (I_c) indicaram que o teor de 10% (CIM10%) foi o único teor que apresentou pouca influência nas reações de hidratação da pasta.
- A avaliação pozolânica, efetuada por meio da medição da condutividade elétrica em soluções CH/RIP, indicou elevada reatividade inicial do RIP com perda relativa de condutividade de 15%, após 3 h de ensaio e perda relativa de condutividade superior a 80% após 24 h de ensaio, indicando tratar-se de um material pozolânico.
- O ensaio de início e fim de pega indicou que o teor de substituição 10% de RIP foi o que menos afetou os parâmetros da pasta controle.
- Em relação à porosimetria, o CIM/10% foi o teor que apresentou menor porosidade reduzindo os tamanhos dos poros e, conseqüentemente, aumentando a resistência mecânica da pasta de cimento.
- O ensaio não destrutivo por ultrassom não se mostrou conclusivo.
- Em relação à resistência à compressão simples pode-se concluir, após a análise estatística, que o teor ideal de substituição foi de 10%, não mostrando diferença em relação à pasta controle.

- Apesar do resultado de caracterização ambiental ter classificado o RIP como *Classe I- Perigoso* percebeu-se que ao misturar com outros agregados na fabricação de blocos de concreto, o RIP passa a ser Classe II estando em condições de ser utilizado.

Através dos resultados alcançados, o RIP pode ser considerado como sendo um material pozolânico, porém no processo de fragmentação utilizado seu valor comercial atualmente se mostrou muito acima ao das adições minerais disponíveis no mercado. Uma análise econômica mais aprofundada encontra-se no anexo – D.

7 SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO

- Estudar processos de fragmentação mais eficientes com objetivo de reduzir os custos de britagem e moagem do produto.
- Estudar alternativa de utilização do RIP como agregados que não dependam tanto do processo de moagem.
- Avaliar a possibilidade de reutilização parcial do RIP na fabricação dos isoladores de porcelana.
- Avaliar a possibilidade de utilização do RIP como insumo na fabricação de cimento.
- Avaliar a interferência das reações álcali-agregado nas características das pastas com cimento.
- Avaliar o efeito de novas relações de água: cimento nas pastas com RIP.
- Avaliar durabilidade das pastas com RIP por meio de ensaios acelerados e de campo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, R.; ABO-EL-ENEIN, S. A.; EZZAT, E. Propriedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: mortero y hormigón Properties and durability of metakaolin blended cements: mortar and concrete. **Materiales de Construcción**, v.60, p.33-49, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. Métodos de fabricação de porcelana e Dados de Mercado de Isoladores Elétricos de Porcelana. Disponível: www.abceram.org.br. Acesso em: 21/03/2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Tipos de cimentos. Disponível: www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=20. Acesso em: 21/02/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR 5733** - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, especificação, 1991. 5p.

_____. **NBR 6136** – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria. Requisitos. Rio de Janeiro, 2006. 9p

_____. **NBR 7211** – Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9p.

_____. **NBR 7215** - Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão, Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996. 8p.

_____. **NBR 10.004** – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004. 77p.

_____. **NBR 10.005** – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 20p.

_____. **NBR 10.006** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 77p.

_____. **NBR 12653** - Materiais pozolânicos. Especificação. Rio de Janeiro, 2014. 3p.

_____. **NBR NM 18**. Cimento Portland - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. 2012, 4p.

_____. **NBR NM 65**. Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 4 p., 2003.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C 618** - Standard Test Method for Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete, 2012.

AHMAD, S.; AZAD, A. K. An exploratory study on correlating the permeability of concrete with its porosity and tortuosity. **Advances in Cement Research**, v. 25(5), p. 288-294, 2013.

ATMACA, A.; KANOGLU, M. Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry. **Energy**, v. 42, p. 261-269, 2012.

AY, N.; ÜNAL, M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.497-499, 2000.

AZERÊDO, A. F. N. **Estudo do Resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais**. 2012. 230f. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia e Ciência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

BARROSO, L. F. S. **Avaliação da resistividade elétrica de concretos com adição de metacaulim**. 2013. 104f. TCC – Centro de Exatas e Tecnologia, Universidade da Amazonia, Belém.

BAKOULAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E.; MOROPOULOU, A. Evaluation of pozzolanic activity and physical-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 82, p. 345-351, 2008.

BERALDO, A. L. **Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité**. 1994. 222p. Thèse (de Docteur em Sciences du Bois) - Université de Nancy I, Nancy.

BERALDO, A. L.; BALZAMO, H. Compuestos no estructurales de cemento comerciales y acerrín de maderas argentinas. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, v.11, p., 233-250, 2009.

BERALDO, A. L.; FERREIRA, G. C. S.; MESQUITA, V. H. L. Porcelain waste as a partial Portland cement replacement. In: **Congress Advances in Cement and Concrete Technology in Africa**. Anals...Johanesburg, South Africa: 2013, 8 p.

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

BlcordeirogonzalesGNOZZI, M. C.; BONDUÀ, S. Alternative blended cement with ceramic residues: Corrosion resistance investigation on reinforced mortar. **Cement and Concrete Research**, v.41, p.947–954, 2011.

BONETTI, A. N.; TOMELIN, J. C.; ALARCON, O. E.; OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. Desenvolvimento de porcelana quartzosa para isoladores elétricos de alta tensão. **Exacta**, v.7, p.187-194, 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n.147, p. 3, Seção 1. 3 ago. 2010.

BRASIL. **Agenda 21 Global**. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>>. Acesso: dezembro de 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Luz para Todos**. Disponível em: < <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/asp/>>. Acesso: março de 2016.

BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cement & Concrete Composite**, v.27, p.429–433, 2005.

CAMPOS, M. A.; PAULON, V. A.; DALFRÉ FILHO, J. G. Resíduos cerâmicos no município de Pedreira [SP]: equacionamento e soluções de reciclagem. **Labor & Engenho**, v.7, p.74-83, 2013.

CAMPOS, M. A. **Análise microestrutural e das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos com isoladores elétricos de porcelana**. 2011.

197f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, p. 309-318, 2008.

CASSAGNABÈRE, F.; ESCADEILLAS, G.; MOURET, M. Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23(2), p.775-784, 2009.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009.

CASTRO, A. L.; LIBÓRIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 335, p. 233-251, 2009.

CETESB. **Introdução**. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/residuos-solidos/Residuos-Urbanos/1-introdução>>. Acesso: janeiro de 2015.

CHATTERJI, S. A discussion of the paper “Mercury porosimetry—an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials” by S. Diamond. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p.1657-1658, 2001.

CHEREM DA CUNHA, A. L.; GONÇALVES, J. P.; BUCHLER, P. M.; DWECK, J. Effect of metakaolin pozzolanic activity in the early stages of cement type ii paste and mortar hydration. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 92, p.115- 119, 2008.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. **Observatório Agrícola**, n.8, p. 118, maio. 2015. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_05_13_08_46_55_boletim_graos_maio_2015.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2015.

CORDEIRO, G.C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz em aditivos minerais em concreto**. 2006. 485f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COST, T. Practical Semi Adiabatic Calorimetry for concrete mixture Evaluation. In: TTCC/NCC Conference, 2008, Minneapolis. **Anais...**Minneapolis: IOWA UNIVERSITY INSTITUTE, 2008. p.1-41.

COSTA, C.; CARVALHO, P. A.; BORDADO, J. C.; NUNES, A. Estudo de Argamassas de Base cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, p.31-35, 2009.

CPFL. **Meio Ambiente**. Disponível em: <
<http://www.cpfl.com.br/relatorioanual/2011/SitePages/MeioAmbiente.aspx>>. Acesso:
janeiro de 2015.

DANIYAL, M.; AHMAD, S. Application of Waste Ceramic Tile Aggregates in Concrete. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 4, p. 12808-12815, 2015.

DELVASTO, S.; GUTIERREZ, R. M.; SILVA, Y.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; PAYA, Y.; PERAZZO, N.; AGUILA, I. Adiciones y aditivos sostenibles en pastas, morteros y hormigones. Influencia en las propiedades en estado fresco y endurecido. In _____. **APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRO-INDUSTRIALES COMO FUENTE SOSTENIBLE DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**. 1nd ed. Espanha: Universitat Politècnica de València, 2011. cap. 02, p. 49-80.

DIAMOND, S. Mercury porosimetry – an inappropriate method for measurement of pore size distributions in cement- based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1517-1525, 2000.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 121 -127, 2010.

FERREIRA, G. C. S.; BERALDO, A. L.; MESQUITA, V. H. L.; SHIROMA, L. Substituição parcial do cimento Portland por resíduo de porcelana de isoladores elétricos em

matrizes cimentícia. In: _____ III Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na construção Civil, 2013, São Leopoldo. Anais...São Leopoldo: **Enarc 2013**, 2013. p.1-13.

GARCIA, I.; VIVAR, I.; LIAMAS, B.; JUAN, A.; MORAN, J. Maturity Approach Applied to Concrete by Means of Vicat Tests. **ACI Materials Journal**, v. 105, p. 445-450, 2008.

GOBBI, A. **atividade pozolânica de adições minerais pelas nbr 5751/2012 e nbr 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. 146f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Paraná.

GONZALEZ, A. G. **Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales em cemento. Aplicación em viviendas de bajo coste**. 2009. 139f. Proyecto de Carrera – Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

GUERRA, I.; VIVAR, I.; LIAMAS, B.; JUAN, A.; MORAN, J. Eco-efficient concretes: the effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete. **Waste Management**, v. 29, p. 643-646, 2009.

HACHMI, M.; MOLESMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, v. 24, p. 345-354, 1990.

HIGASHIYAMA, H.; YAGISHITA, F.; SANO, M., TAKAHASHI, O. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 96- 101, 2012.

HIGASHIYAMA, H.; YAMAUCHI, K.; SAPPAKITTIPAKORN, M.; SANO, M., TAKAHASHI, O. A visual investigation on chloride ingress into ceramic waste aggregate mortars having different water to cement ratios. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1021- 1028, 2013.

HIGASHIYAMA, H.; SAPPAKITTIPAKORN, M.; SANO, M., TAKAHASHI, O. A., TSUKUMA, S. Characteristics of chloride ingress into mortars containing ceramic waste aggregate. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 17, p. 513- 521, 2015.

IBRACON. **Cimento/ Concretos: Materiais Construtivos em Continua Evolução.** Disponível em: <
http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto51.pdf. Acesso: janeiro de 2008.

INDIAN STANDARDS INSTITUTION- **IS 1344**- Specification for calcined clay pozzolan, 2008.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A.L.G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p.69-76, 2003.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinzas e Aglomerantes Alternativos.** In: FREIRE, W. J; BERALDO, A. L (Coord.). **Tecnologia e Materiais Alternativos de Construção.** 2ª edição. Campinas: Editora da Unicamp, 2013. cap. 6. p. 145-190, 2013.

JUAN, A.; MEDINA, C.; GUERRA, M. I.; MORÁN, J. M.; AGUADO, P. J.; ROJAS, M. I. S. de; FRÍAS, M.; RODRÍGUEZ, O. Re-use of ceramic wastes in construction. **Ceramic Materials**, p. 197-214, 2010.

KURDOWSKI, W. **Cement and Concrete Chemistry.** 1nd ed. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2014. 705p.

KWAN, S.; La ROSA, J. e GRUTZECK, M. W., Si and Al MASNMR Study of Stratlingita. **Journal of the American Ceramic Society.** V. 78, p. 1921-1926, 1995.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. F. Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n.4, p. 383389, 2010.

LOPEZ, V.; LHAMAS, B.; JUAN, A.; MORÁN, J. M.; GUERRA, I. O. Eco-efficient Concretes: Impact of the Use of White Ceramic Powder on the Mechanical Properties of Concrete. **Biosystems Engineering**, p. 559-564, 2007.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p. 63-68, 1989.

LYRA, J. S. **Estudo da influência do policarboxilato comercial na hidratação, reologia e físico química de superfície do cimento**. 2010. 115p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Metalurgia e Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo.

MANTUANO NETTO, R. **Materiais pozolânicos**. 2006. 149f. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Zootecnia, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDEENDORF, B., GEHRKE, M., BUDELMANN, H. “Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction”, **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p.1525-1536, 1998.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. Gestão Energética, Econômica e Ambiental do Resíduo Casca de Arroz em Pequenas e Médias Agroindústrias de Arroz. In: XIII Simpósio de Engenharia de Produção, 2006, Anais...Bauru: **SIMPEP**, 2006. p.1-11.

Mc CARTER, W. J.; TRAN, D. Monitoring pozzolanic activity by direct activation with calcium hydroxide, **Construction and Building Materials**, v.10, p.179-184, 1995.

MECHTI, W.; MNIF, T.; SAMET, B.; ROUIS, M. J. Effects of the Secondary Minerals on the Pozzolanic Activity of Calcined Clay: Case of Quartz. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, v.12, p.61 – 71, 2012.

MEDINA, C.; FRIAS, M.; ROJAS, M. I. S. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v.31, p.112-118, 2012.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do Metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 151p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MEHTA, P. K. Natural Pozzolans. Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET-SP-86- 8e, **Canadian Government Publishing Center**, Supply and Services. Ottawa, v. 1, p.1-33, 1987.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1994.

MORAES, J. C. B. **Utilização da cinza de folha de cana-de-açúcar como material pozolânico em matrizes cimentantes**. 2015. 74p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

NAKANISHI, E. Y. **Cinza residual da queima de biomassa do capim elefante (*Pennisetum purpureum*) como material pozolânico substituto do cimento Portland**. 2013. 112p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

NEVES JUNIOR, A.; LEMOS, M. S.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; DWECK, J. Early stages hydration of high initial strength Portland cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, p. 659-665, 2013.

NGK INSULATOR JAPAN. **NGK Overseas Group Companies – Site Report**. Disponível em: < <http://www.ngk.co.jp/english/csr/eco/sitereport/pdf/26.pdf>>. Acesso: junho de 2013.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Editora Fazendo Arte, 2000.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic waste in concrete. **Construction and Building Materials**, n. 24, p. 832- 838, 2010.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. **Materials and Structures**, n. 44, p. 155-157, 2011.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S.; LABRINCHA, J.; JOHN, V. M. **Eco-efficient concrete**. 1nd ed. Philadelphia:Woodhead Publishing Limited, 2013. 624 p.

PATEL, V. N.; SHAH, N. Suitability of Porcelain and Marble Industrial Waste Powder to Produce High Performance Concrete. **American Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 3, n. 3, p. 59-63, 2015.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; MELLADO, A.; ORDONEZ, L.M. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 227-231, 2001.

PEREIRA, A. M.; RUFINO DA SILVA, A. C.; QUEIROZ, D. C. A.; MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Matéria**, v. 20, p. 227-238, 2015.

PIMENTEL, L. L. **Durabilidade de argamassas modificadas por polímeros e reforçadas com fibras vegetais**. 2004. 139p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

PINHEIRO, I. S. **Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica**. 2008. 152p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

POON, C. S.; Lama, L.; KOUA, S. C.; Wonga, Y. L.; Wong, R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.31, p.1301–1306, 2001.

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**, v52, p.155-167, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v52n323/32084.pdf>>. Acesso: maio de 2013.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFMG, Minas Gerais.

PRETTE, A. L. G. **Desenvolvimento de esmaltes cerâmicos: Aplicação em isoladores elétricos de alto desempenho.** 2013. 77p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais de hidratação do cimento Portland – Estudo em Pastas.** 2008. p.188. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica de São Paulo – Universidade de São Paulo, São Paulo.

RAVAL, A. V.; PATEL, I.; PITRODA, J. Ceramic Waste : Effective Replacement Of Cement For Establishing Sustainable Concrete. **International Journal of Engineering Trends and Technology.** v.4, p. 2324-2329, 2013.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. M. S.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Estudo das reações alcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. **Cerâmica.** v. 58, p. 90-98, 2012.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do Metacaulim de alta reatividade.** 2005. p. 96. Dissertação (mestrado) – Faculdade de engenharia e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

ROCHA, L; PERES, A. E. C. Aproveitamento econômico das lamas de ferro. **Revista Escola de Minas.** v. 62, Nº 3, p. 291-295, 2009.

RODRIGUES, M. S.; BERALDO, A.L. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual. **Engenharia Agrícola,** v. 30 (2), p. 193-204, 2010.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias.** 2012. 131f. Tese (doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RODRIGUES, L. L. **Caracterização de materiais descartados de redes de distribuição de eletricidade para fins de reciclagem.** 2010. 131p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, São Paulo.

SANTOS, S. F.; TONOLI, G. H. D.; SAVASTANO JR, H. Adiciones y aditivos sostenibles en pastas, morteros y hormigones. Influencia en las propiedades en estado fresco y

endurecido. In _____. **Matérias-primas e processos de fabricação para fibrocimento**. 1nd ed. Espanha: Universitat Politècnica de València, 2011. cap. 15, p. 327-340.

SANTOS, N. **Avaliação de micro e nanoporosidade de argamassas colantes**. 2006. 132p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SANTOS, C. E. O. **Análise de blocos estruturais de concreto utilizando a técnica da ultrassonografia**. 2008. 85p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOLAIA, A. P. P.; CARDIM JUNIOR, W. H.; LINTZ, R. C. C.; BOZZA, J. L. Utilização da adição de resíduo de porcelana em concretos. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. **Anais... do 49º Congresso Brasileiro do Concreto-CBC2007**. Bento Gonçalves: IBRACON, 2007. p.1-9.

SATA, V.; TANQPAGASIT, J.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. **Cement and Concrete composite**. v.34, p. 94 – 100, 2012

SENTHAMARAI, RM., DEVADAS MANOHARAN, P. J., GOBINATH, D. Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 2413-2419, 2011.

SENTHAMARAI, RM.; DEVADAS MANOHARAN, P. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement & Concrete Composites**, v.27, p. 910-913, 2005.

SHEKARCHI, M.; BONAKDAR, A.; BAKHSHI, M.; MIRDAMADI, A.; MOBASHER, B. Transport properties in metakaolin blended concrete. **Construction and Building Materials**, v.24, p. 2217-2223, 2010.

SILVA, C. A. R. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2004. 130p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, São Paulo.

SILVA, A.; JOHN, V. M.; RIBEIRO, J. L. D.; ROMAN, H. R. Pore size distribution of hydrated cement pastes modified with polymers. **Cement and Concrete Research**, v.31, p.1177–1184, 2001.

SISTEMA INTEGRADO NACIONAL - SIN. **Previsões de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2015 – 2019 2ª Revisão Quadrimestral**. Disponível em: < [http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Boletim%20Tecnico%20ONS-EPE%20-%202%C2%AA%20Rev%20Quad-%202015-2019%20\(17-07-15\).pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Boletim%20Tecnico%20ONS-EPE%20-%202%C2%AA%20Rev%20Quad-%202015-2019%20(17-07-15).pdf)>. Acesso: março de 2016.

SOUZA, F. J. P.; NEVES, W. F.; ALARCON, O. E. Estudo da viabilidade de isoladores elétricos a partir de resíduo de esmaltação. **Cerâmica** **50**, p. 217-224, 2004.

SOUZA, V. C. G.; SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M, M. Estudo da influência da microestrutura do clínquer sobre a moagem na fabricação de cimento: microscopia eletrônica de varredura. **Revista Escola de Minas**, p. 209-213, 2002.

SOUZA, A. F. **Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação de cimento em água de lavagem de caminhões-betoneira para produção de concreto**. 2007. 182p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

TAYLOR, P. Why monitor concrete temperature and how?. In: TTCC/ NCC Conference, 2008, Minneapolis. **Anais...**Minneapolis: IOWA UNIVERSITY INSTITUTE, 2008. p.1-34.

TASHIMA, M. M., FIORITI, C. F., AKASAKI, J. L., PAYÁ, J., SOUZA, L. C., MELGES, J. L. P. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, n. 2, v. 12, p. 151-163, 2012.

TEPCO JAPAN. **TEPCO's Efforts toward recycling of industrial waste etc**. Disponível em: < <http://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/overview/pdf-4/42-e.pdf>>. Acesso: junho de 2013.

TORKITTIKUL, P.; CHAIPANICH, A. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. **Cement Concrete Composites**, n. 32, v. 6, p. 440-449, 2010.

TORALLES-CARBONARI, B. M., CAVALARO, S. H., CASTANHA, J. C. M., GUACELLI, P. A. G., SILVA, C. C. Utilization of the ultrasonic method to evaluate the properties of high performance concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v.3, n° 4, p. 494-511, 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Test Method 1312** – Synthetic Precipitation Leaching Procedure. 1994. 30p

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, v.10, p.77-90, 2010.

VEJMELKOVÁ, E.; KULOVANÁ, T.; KEPPERT, M.; KONVALINKA, P.; ONDRÁČEK, M.; SEDLMAJER, M.; CERNY, R. Application of Waste Ceramics as Active Pozzolana in Concrete Production. In: International Conference on Technological Advancements in Civil Engineering, 2012, Coimbatore. **Anais...** Coimbatore: ICTACE. IACSIT Press, 2012. v.12, p. 132-136

VIEIRA, C. M. F., TEIXEIRA, S. S., TOLEDO, R., SOUZA, S. D. C., MONTEIRO, S. N. Porcelana elétrica com resíduo da serragem de rocha ornamental, parte 1: evolução microestrutural, propriedades físicas e mecânicas. **Revista Matéria**. v.11, n° 4, p. 427-434, 2006.

VILLAR-COCIÑA, E. **Modelos cinéticos para la caracterización de materiales puzolánicos y mezclas de moldeo para fundición de hierro**. 168 p. Tese de Doctorado (Doctorado en Ciencias Físicas) – Facultad de Matemática, Física y Computación, Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2005.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz**. 2001. 98p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

WU, M. **Using low temperature calorimetry and moisture fixation method to study the pore structure of cement based materials**. 310p. (PhD thesis in Civil Engineering). Department of Civil Engineering Technical University of Denmark, Denmark, 2014.

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; LIU, X. The filling role of pozzolanic material. **Cement and Concrete Research**. n26, v.6, p.943-947, 1996.

ZIMBILI, O; SALIM, W; NDAMBUKI, M. A Review on the Usage of Ceramic Wastes in Concrete Production. **International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering**, n. 1, v. 8, p. 91-95, 2014.

ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 1999. 133p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Anexo A - Análise Estatística “ *Multiple Range Tests* “

Resistência à Compressão Simples

Tabela A1. Análise “Multiple Range Tests” para resistência à compressão, fator: teor de substituição- Method: 95,0 percent LSD

<i>Teor</i>	<i>Count</i>	<i>LS Mean</i>	<i>LS Sigma</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
40%	24	28,4079	1,51422	X
20%	24	32,6129	1,51422	XX
30%	24	33,1842	1,51422	X
10%	24	35,3179	1,51422	XX
referência	24	39,1833	1,51422	X

Teor: 40% (28,41) <= 20% (32,61) = 30% (33,18) <= 10% (35,32) = Referência (39,18)

Tabela A228. Análise “Multiple Range Tests” para resistência à compressão, fator: idade - Method: 95,0 percent LSD

<i>Idade</i>	<i>Count</i>	<i>LS Mean</i>	<i>LS Sigma</i>	<i>Homogeneous Groups</i>
7	30	26,592	1,35436	X
28	30	35,162	1,35436	X
121	30	36,1783	1,35436	X
91	30	37,0327	1,35436	X

Idade: 7 (26,59) < 28 (35,16) = 121 (36,18) = 91 (37,03)

Anexo B – Análise Ambiental – ABNT NBR 10.004 (2004)



TASQA Serviços Analíticos Ltda
 CNPJ 67.994.897/0001-97
 Praça 28 de Fevereiro, 55 – Nova Paulínia
 CEP 13140-385 – Paulínia – SP
 Fone/Fax: (19) 2138-8888 / (19) 2138-8885
 Home Page: <http://www.tasqa.com.br>

RELATÓRIO DE ENSAIO

Nº 60061/2014-1.0



Empresa solicitante: Universidade Estadual de Campinas
CNPJ/CPF: 46.068.425/0001-33
Solicitante: Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira
Endereço: Rua da Reitoria, s/n - - Cidade Universitária - Campinas - São Paulo - CEP: 13.083-872
Proposta Comercial Nº: 4627/2014

Identificação da Amostra

RESÍDUOS ISOLADOR DE PORCELANA.

Objetivo

ENSAIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS
NORMA: ABNT/NBR 10004:2004 - RESÍDUOS SÓLIDOS (CLASSIFICAÇÃO)

Data de Início das Análises

29/10/2014

Data de Conclusão das Análises

11/11/2014

**“Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações.
 A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.”**

Laboratório Ambiental (CRL 0165): CNPJ 67.994.897/0001-97 - Praça 28 de Fevereiro, 55 – Nova Paulínia - Paulínia (SP) - CEP 13140-000
 Laboratório de Biologia (CRL 0188): CNPJ 67.994.897/0002-78 - Av. José Paulino, 1217 - Centro - Paulínia (SP) - CEP 13140-000
 TASQA Serviços Analíticos Ltda - Ipatinga (CRL 0388): CNPJ 67.994.897/0003-59 - R. Pero Vaz de Caminha, 329 A - Bom Retiro - Ipatinga (MG) - CEP 35160-238



TASQA Serviços Analíticos Ltda
 CNPJ 67.994.897/0001-97
 Praça 28 de Fevereiro, 55 - Nova Paulínia
 CEP 13140-285 - Paulínia - SP
 Fone/Fax: (19) 2138-8888 / (19) 2138-8885
 Home Page: <http://www.tasqa.com.br>

RELATÓRIO DE ENSAIO

Nº 60061/2014-1.0



61628/2014-1.0 - Branco SVOC (EPA 8270)-(NBR 10006-Solub)

Parâmetros	[CAS]	Unidade	Branco
a Clordano	[5103-71-9]	mg/L	< LQ
g Clordano	[5103-74-2]	mg/L	< LQ
Heptacloro e seu epóxido	[76-44-8][1024-57-3]	mg/L	< LQ

Traçador (Surrogate) - Recuperação no Branco (%)

Parâmetros	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
2-Fluorobifenil (Sol)	100	70 - 130

VOC (EPA 8260)-(NBR 10004-Lix)

61315/2014-1.0 - Branco VOC (EPA 8260)-(NBR 10004-Lix)

Parâmetros	[CAS]	Unidade	Branco
Benzeno	[71-43-2]	mg/L	< LQ
Clorobenzeno	[108-90-7]	mg/L	< LQ
Clorofórmio	[67-66-3]	mg/L	< LQ
1,4-Diclorobenzeno	[106-46-7]	mg/L	< LQ
1,2-Dicloroetano	[107-06-2]	mg/L	< LQ
Hexaclorobutadieno	[87-68-3]	mg/L	< LQ
Tetracloreto de Carbono	[56-23-5]	mg/L	< LQ
Cloro de vinila	[75-01-4]	mg/L	< LQ
1,1-Dicloroetileno	[75-35-4]	mg/L	< LQ
Tetracloroetileno	[127-18-4]	mg/L	< LQ
Tricloroetileno	[79-01-6]	mg/L	< LQ
Piridina	[110-86-1]	mg/L	< LQ
Metiltetrolona	[78-93-3]	mg/L	< LQ

Traçador (Surrogate) - Recuperação no Branco (%)

Parâmetros	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
4-Bromofluorbenzeno (Lix)	100	70 - 130

61316/2014-1.0 - Branco Fortificado VOC (EPA 8260)-(NBR 10004-Lix)

Parâmetros	[CAS]	Recuperação em branco fortificado (%)
Benzeno	[71-43-2]	82
Clorofórmio	[67-66-3]	88
Tetracloreto de Carbono	[56-23-5]	85

Massa Bruta

- ✓ Estado Físico:
- ✓ Sólido: estado da matéria, cujas características são ter volume e forma definidos
- ✓ Líquido: estado da matéria no qual a distância entre suas moléculas é suficiente para se adequar a sua forma, porém sem alterar o volume.
- ✓ Óleos Minerais: parâmetro indicador de presença de substâncias que precisam de confirmação, ou seja, é um método de triagem e não caracterizador de toxicidade.

Notas:

⁽¹⁾ LQ: Limite de Quantificação

Laboratório Ambiental (CRL 0186): CNPJ 67.994.897/0001-97 - Praça 28 de Fevereiro, 55 - Nova Paulínia - Paulínia (SP) - CEP 13140-000
 Laboratório de Biologia (CRL 0188): CNPJ 67.994.897/0002-78 - Av. José Paulino, 1217 - Centro - Paulínia (SP) - CEP 13140-000
 TASQA Serviços Analíticos Ltda - Ipatinga (CRL 0386): CNPJ 67.994.897/0003-59 - R. Pero Vaz de Caminha, 329 A - Bom Retiro - Ipatinga (MG) - CEP 35160-238



TASQA Serviços Analíticos Ltda
 CNPJ 67.994.897/0001-97
 Praça 28 de Fevereiro, 55 - Nova Paulínia
 CEP 13140-285 - Paulínia - SP
 Fone/Fax: (19) 2138-8888 / (19) 2138-8885
 Home Page: <http://www.tasqa.com.br>

RELATÓRIO DE ENSAIO

Nº 60061/2014-1.0



⁽²⁾VMP: Valores Máximos Permitidos.

> As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste Laboratório <

INTERPRETAÇÃO

Massa Bruta: O(s) parâmetro(s) analisado(s) apresentou(aram) valor(es) adequado(s) à(s) indicada(s) na norma ABNT/NBR 10004:2004.

Lixiviado: O(s) parâmetro(s) analisado(s) Chumbo apresentou(aram) concentração(ões) superiores à(s) indicada(s) no Anexo F da norma ABNT NBR 10004:2004.

Solubilizado: O(s) parâmetro(s) analisado(s) Alumínio, Chumbo apresentou(aram) concentração(ões) superiores à(s) indicada(s) no Anexo G da norma ABNT NBR 10004:2004.

Baseado nos resultados obtidos para a amostra, a classificação foi:
Classe I - Resíduo Perigoso.

Nota:

A interpretação apresentada no Relatório de Ensaio tem caráter orientador ao gerador do resíduo, contudo, o Órgão de Controle Ambiental tem autoridade para a avaliação das características do resíduo e sua classificação em função dos resultados analíticos apresentados.

Vivian Rafaela Koenig 11/11/2014
 Supervisora - Lab. Orgânica
 CRQ 04449813 - 4ª Região

Wagner Rodrigues dos Santos 11/11/2014
 Supervisor - Lab. Análise Metais/LAA
 CRQ 04418028 - 4ª Região

Ronaldo Secomandi 11/11/2014
 Supervisor - Lab. Via Úmida/Potenciometria
 CRQ 04458691 - 4ª Região

Código para verificação de autenticidade deste documento:

1411141211147463

Instruções para a verificação de autenticidade de documentos
 1º - Acesse a página <http://www.tasqa.com.br/conteudo/autenticidade>
 2º - Digite o código de autenticidade do documento e clique em pesquisar
 3º - Clique em Abrir Documento

Laboratório Ambiental (CRL 0165): CNPJ 67.994.897/0001-97 - Praça 28 de Fevereiro, 55 - Nova Paulínia - Paulínia (SP) - CEP 13140-000
 Laboratório de Biologia (CRL 0168): CNPJ 67.994.897/0002-78 - Av. José Paulino, 1217 - Centro - Paulínia (SP) - CEP 13140-000
 TASQA Serviços Analíticos Ltda - Ipatinga (CRL 0388): CNPJ 67.994.897/0003-59 - R. Pero Vaz de Caminha, 329 A - Bom Retiro - Ipatinga (MG) - CEP 35160-238

Anexo C – Granulometria Laser



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br
 Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Relatório:

MAL 314-15

Ciente:

ANTONIO LUDOVICO BERALDO

Amostra:

Cimento CP5

Notas:

Vel. Bomba: 2500 rpm
 Meio de dispersão: álcool
 isopropílico Ultrassom: 1 min.

POP:**Analista:**

Beatriz

Fonte de resultados:

Edited

Data da medida:

quinta-feira, 15 de outubro de 2015 10:16:16

Data da análise:

quinta-feira, 15 de outubro de 2015 12:59:18

Código I.R.:

1.68_0.001

I.R. da partícula:

1.680

Dispersante:

isopropyl alcohol

Amostrador:

Hydro 2000MU (A)

Absorção:

0.001

I.R. do dispersante:

1.377

Tipo de análise:

General purpose

Faixa de tamanho:0.020 to 2000.000 μ m**Resíduo:**

0.553 %

Sensitividade:

Normal

Obscurecência:

14.05 %

Result Emulation:

Off

Concentração:

0.0144 %Vol

Span :

2.156

Uniformidade:

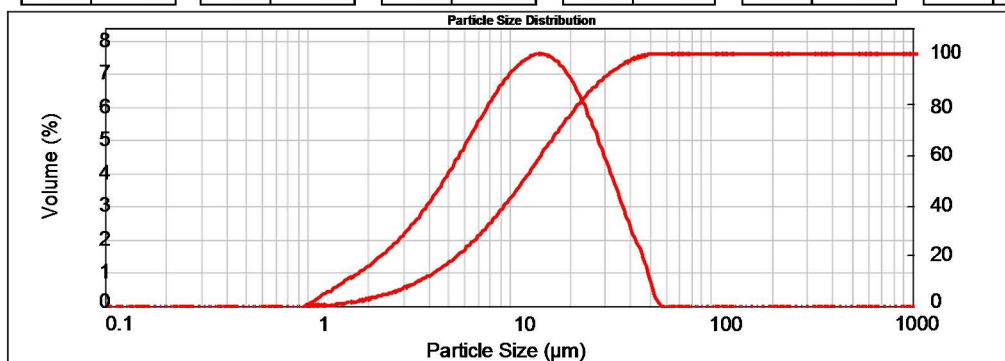
0.663

Tipo de distribuição:

Volume

Área superf. espec.:0.773 m^2/g **D[3,2]:**7.759 μ m**D[4,3]:**14.335 μ m**d(0.1): 3.598 μ m****d(0.5): 11.792 μ m****d(0.9): 29.024 μ m**

Size (μ m)	Vol Under %	Size (μ m)	Vol Under %	Size (μ m)	Vol Under %	Size (μ m)	Vol Under %	Size (μ m)	Vol Under %	Size (μ m)	Vol Under %	Size (μ m)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	28.09	50.238	99.85	355.656	100.00		
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.08	7.962	32.47	56.368	100.00	399.052	100.00		
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.34	8.934	37.24	63.246	100.00	447.744	100.00		
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.72	10.024	42.34	70.963	100.00	502.377	100.00		
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.25	11.247	47.72	79.621	100.00	563.677	100.00		
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	1.92	12.619	53.31	89.337	100.00	632.456	100.00		
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.75	14.159	59.01	100.237	100.00	709.627	100.00		
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	3.75	15.887	64.72	112.468	100.00	796.214	100.00		
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	4.92	17.825	70.31	126.191	100.00	893.367	100.00		
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	6.31	20.000	75.66	141.589	100.00	1002.374	100.00		
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	7.92	22.440	80.66	158.866	100.00	1124.683	100.00		
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	9.79	25.179	85.18	178.250	100.00	1261.915	100.00		
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	11.96	28.251	89.16	200.000	100.00	1415.892	100.00		
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	14.44	31.698	92.51	224.404	100.00	1588.656	100.00		
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	17.28	35.566	95.25	251.785	100.00	1782.502	100.00		
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	20.49	39.905	97.37	282.508	100.00	2000.000	100.00		
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	24.09	44.774	98.88	316.979	100.00				



Prof. Dr. Henrique Kahn
 Coordenador do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari
 Pesquisadora do LCT-EPUSP



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br
Tel: 11 3091-5151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



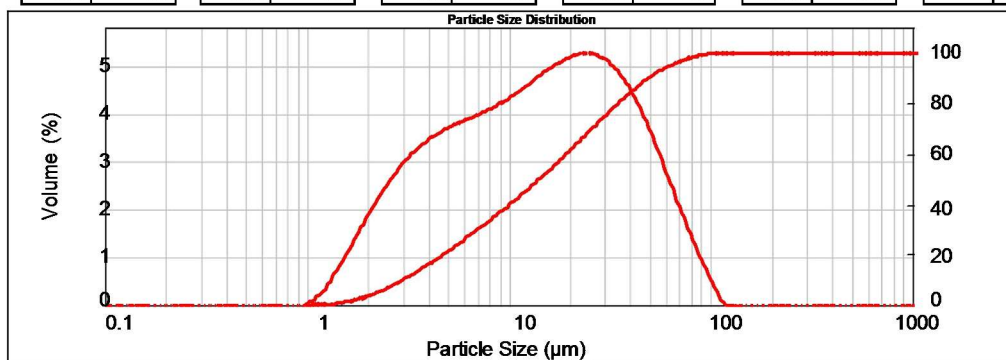
RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Relatório: MAL 198-15	POP:	Data da medida: terça-feira, 21 de julho de 2015 11:24:18
Ciente: ANTONIO LUDOVICO BERALDO	Analista: Beatriz	Data da análise: terça-feira, 21 de julho de 2015 11:24:19
Amostra: Resíduo Isolador Porcelana (RIP)	Fonte de resultados: Edited	
Notas: Vel. Bomba: 2500 rpm Meio de dispersão: água deionizada Dispersante: cal gon Ultrassom: 1 min.		

Código I.R.: 1.54_0.001	Amostrador: Hydro 2000MU (A)	Tipo de análise: General purpose	Sensitividade: Normal
I.R. da partícula: 1.540	Absorção: 0.001	Faixa de tamanho: 0.020 to 2000.000 µm	Obscurecência: 6.52 %
Dispersante: Water	I.R. do dispersante: 1.330	Resíduo: 0.703 %	Result Emulation: Off

Concentração: 0.0059 %Vol	Span : 3.259	Uniformidade: 1.02	Tipo de distribuição: Volume
Área superf. espec.: 0.298 m²/g	D[3,2]: 7.599 µm	D[4,3]: 20.776 µm	
d(0.1): 2.964 µm	d(0.5): 14.099 µm	d(0.9): 48.915 µm	

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	30.43	50.238	90.64	355.856	100.00		
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.08	7.962	33.48	56.368	93.18	399.052	100.00		
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.27	8.934	36.61	63.246	95.30	447.744	100.00		
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.73	10.024	39.82	70.963	97.00	502.377	100.00		
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.43	11.247	43.14	79.621	98.29	563.677	100.00		
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	2.41	12.619	46.58	89.337	99.20	632.456	100.00		
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	3.68	14.159	50.13	100.237	99.77	709.627	100.00		
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	5.23	15.887	53.80	112.468	100.00	796.214	100.00		
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	7.04	17.825	57.59	126.191	100.00	893.367	100.00		
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	9.09	20.000	61.46	141.589	100.00	1002.374	100.00		
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	11.33	22.440	65.40	158.866	100.00	1124.683	100.00		
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	13.74	25.179	69.37	178.250	100.00	1261.915	100.00		
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	16.29	28.251	73.33	200.000	100.00	1415.892	100.00		
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	18.95	31.698	77.20	224.404	100.00	1588.656	100.00		
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	21.71	35.566	80.94	251.785	100.00	1782.502	100.00		
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	24.55	39.905	84.47	282.508	100.00	2000.000	100.00		
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	27.46	44.774	87.72	316.979	100.00				



Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari
Pesquisadora do LCT-EPUSP

Anexo D –Análise Econômica

Para a análise de viabilidade econômica da substituição parcial do cimento Portland pelo RIP torna-se necessário compará-la com a utilização de uma adição mineral ou material pozolânico já comercializado, como são os casos da cinza de casca de arroz e metacaulim. A CCA é comercializada no mercado a R\$ 1,40/kg, enquanto o metacaulim a R\$1,20/kg conforme informações obtidas junto à empresa Sílica Brasil (www.silicabrasil.com.br) e (www.metacaulim.com.br).

Para a fragmentação do RIP foi escolhida uma empresa especializada em moagem de materiais cerâmicos, a New Tech, situada em Rio Claro - SP. A empresa ainda não havia beneficiado este tipo de material tendo adotado empiricamente parâmetros de processo de produtos cerâmicos similares, a saber:

- A potência instalada total dos equipamentos seria de 50 HP (20 HP para os britadores e 30 HP para o moinho-de-bolas);
- O número de funcionários necessários para o processo seria de 2 (dois);
- O tempo total de processo para moer a carga máxima do moinho-de-bolas, de 600 kg seria de, aproximadamente, 12 h;
- Além disso, foram inseridos outros custos tais como, custo de amortização de equipamentos, aluguel do imóvel, números de funcionários indiretos e despesas com manutenção.

Com a terceirização da fragmentação do RIP elimina-se a necessidade de investimentos em máquinas e equipamentos para o processo. Os custos fixos com aluguel, depreciação de equipamentos, funcionários e outros custos estão incorporados no valor cobrado pela empresa terceirizada de R\$ 2,00/ kg.

Na comparação entre o RIP e a CCA, conclui-se que esta rota tecnológica escolhida para a fragmentação do RIP é onerosa, sendo o custo de processamento 42,85% superior com o qual a cinza é comercializada. Para a inserção do RIP no mercado como adição mineral se torna necessário, portanto, adequar o custo de produção e o de venda do produto. A fragmentação do RIP ao adotar-se uma rota tecnológica mais eficiente, com equipamentos mais modernos e automatizados, poderia apresentar melhores resultados de custos e permitindo até aumentar o teor de substituição adotado de 10% (CIM/10%), considerando-se os resultados alcançados pelo processo utilizado neste trabalho. Para efeito comparativo, no processo de fabricação de cimento o custo de energia de moagem é muito elevado

atingindo até 26% do consumo total de energia elétrica, conforme relatado por Atmaca e Kanoglu (2012).

Para este cenário estudado, um teor de substituição de 10% de cimento por RIP em uma fábrica de pequeno porte para a produção de blocos vazados de concreto, com capacidade de produção de 200.000 blocos por mês representaria um consumo de 14,12 toneladas de RIP. Essa troca acarretaria em um aumento de custo de matéria-prima de 16,39%. Para a CCA, o aumento seria de 10,21%, enquanto que para o metacaulim seria de 8,14%.

Os traços utilizados para o cálculo estão demonstrados nas Tabela 29, 30, 31 e 32. A princípio, tanto o RIP quanto a CCA implicariam em aumento dos custos. Além disso, o empresário ainda deveria considerar que a fábrica deveria investir em instalações para acondicionar o RIP, além de dispor de equipamentos para fragmentação e assumir custos de licença de funcionamento perante o órgão regulador. Vale lembrar que por se tratar de um resíduo, a fábrica de blocos vazados teria que preparar-se para inspeções mais rígidas do órgão ambiental, sendo uma situação que antes não existia, ao consumir materiais convencionais (pedrisco e pó-de-pedra).

Tabela 29. Consumo de matérias-primas convencionais em uma máquina hidráulica.

Fonte: Columbia Machine (www.columbiamachine.com)

Insumos	Preço R\$/ton	Consumo mensal de materiais		Custo	
		toneladas	%	R\$/totais	%
cimento	R\$ 410,00	141,2	5,88	R\$ 57.892,00	42,27
pedrisco	R\$ 35,00	564,8	23,53	R\$ 19.768,00	14,43
pó-de-pedra	R\$ 35,00	1694,2	70,59	R\$ 59.297,00	43,30
		2400,20	100,00	R\$ 136.957,00	100,00

Tabela 30. Consumo de matérias-primas com teor de 10% de substituição de cimento ARI por RIP em uma máquina hidráulica.

Insumos	Preço R\$/ton	Consumo mensal de materiais		Custo	
		toneladas	%	R\$/totais	%
cimento	R\$ 410,00	127,08	5,29	R\$ 52.102,80	34,52
RIP	R\$ 2.000,00	14,12	0,59	R\$ 28.240,00	18,71
pedrisco	R\$ 35,00	564,8	23,53	R\$ 19.768,00	13,10
pó-de-pedra	R\$ 35,00	1694,2	70,59	R\$ 59.297,00	39,29
		2400,20	100,00	R\$ 159.407,80	100,00

Tabela 31. Consumo de matérias-primas com teor de 10% de substituição de cimento ARI por CCA em uma máquina hidráulica.

Insumos	Preço R\$/ton	Consumo mensal de materiais		Custo	
		toneladas	%	R\$/totais	%
cimento	R\$ 410,00	127,08	5,29	R\$ 52.102,80	34,52
CCA	R\$ 1.400,00	14,12	0,59	R\$ 19.768,00	13,10
pedrisco	R\$ 35,00	564,8	23,53	R\$ 19.768,00	13,10
pó-de-pedra	R\$ 35,00	1694,2	70,59	R\$ 59.297,00	39,29
		2400,20	100,00	R\$ 150.935,80	100,00

Tabela 32. Consumo de matérias-primas com teor de 10% de substituição de cimento ARI por metacaulim em uma máquina hidráulica.

Insumos	Preço R\$/ton	Consumo mensal de materiais		Custo	
		toneladas	%	R\$/totais	%
cimento	R\$ 410,00	127,08	5,29	R\$ 52.102,80	34,52
Metacaulim	R\$ 1.200,00	14,12	0,59	R\$ 16.944,00	11,23
pedrisco	R\$ 35,00	564,8	23,53	R\$ 19.768,00	13,10
pó-de-pedra	R\$ 35,00	1694,2	70,59	R\$ 59.297,00	39,29
		2400,20	100,00	R\$ 148.111,80	100,00

Outro ponto a ser analisado é que seriam necessárias em torno de 27 fábricas do mesmo porte para consumir todo o RIP gerado mensalmente pela CPFL e assim destiná-lo corretamente. Torna-se, portanto, uma situação que requer mais controle por parte do gerador do resíduo para disponibilizá-lo para estes potenciais consumidores, pois os mesmos certamente não estarão tão próximos uns dos outros.

Nessa nova rota tecnológica que poderá ser criada há necessidade de haver contrapartida por parte da empresa geradora, assumindo os custos de frete do resíduo e até mesmo buscando incentivos financeiros para que o empresário consuma o resíduo por ela gerado, de forma que a empresa possa atender às exigências da Lei 12.305.