

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

GABRIELA CASSOL

**CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA
COMO MATERIAL POZOLÂNICO EM MATRIZES CIMENTANTES**

Ilha Solteira
2015

GABRIELA CASSOL

**CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA
COMO MATERIAL POZOLÂNICO EM MATRIZES CIMENTANTES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Conhecimento: Estruturas.

Prof. Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini

Orientador

Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima

Co-orientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Cassol, Gabriela.

C345c Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes / Gabriela Cassol. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
82 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2015

Orientador: Antonio Anderson da Silva Segantini

Co-orientador: Mauro Mitsuuchi Tashima

Inclui bibliografia

1. Atividade pozolânica. 2. Cimento portland. 3. Resíduo de cerâmica vermelha.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes

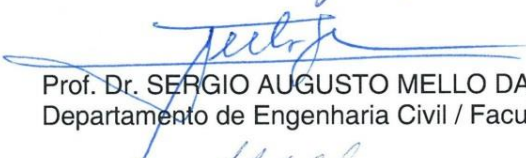
AUTORA: GABRIELA CASSOL

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL , Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. DAVID DE CARVALHO
Departamento de Construções Rurais / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 31 de julho de 2015.

Aos meus pais, as minhas irmãs e ao meu noivo, pelo amor, paciência e compreensão durante todo este tempo.

AGRADECIMENTOS

Estou prestes a concluir mais uma etapa da minha vida e se faz necessário agradecer a todos que de alguma forma me ajudaram a conquistar este sonho.

Agradeço primeiramente a Deus, que me fez superar as dificuldades e seguir em frente.

A uma das pessoas mais especiais que Deus colocou na minha vida, meu pai Gilmar que sempre esteve presente em todas as etapas importantes da minha vida me auxiliando e me dando todo o suporte necessário para alcançar meus objetivos e que me deu a oportunidade de estudar e ter uma profissão na vida.

A minha mãe pelo amor, paciência e pelas horas passadas ao telefone me incentivando a nunca desistir dos meus sonhos.

E as minhas irmãs, Débora e Patrícia, pela motivação, apoio e ajuda nessa caminhada, por serem minhas melhores amigas e a quem eu sei que posso confiar.

Em especial ao meu noivo Maxwell por sempre ter me apoiado e auxiliado. Sou abençoada por ter você em minha vida, e hoje só tenho a lhe agradecer e se hoje cheguei até aqui foi porque você me apoiou.

Aos meus colegas de mestrado João Cláudio, Cleiton, Luiz Gustavo, Daniela e Priscila pela ajuda, pelas conversas produtivas e trocas de ideias durante o período do mestrado.

Aos técnicos do laboratório Gilson Campos Correa, Flávio Rogério Porato e Mário Roberto Correa Ferreira por me ajudarem na realização dos ensaios.

Ao meu orientador Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini, por ter aceito me orientar, pelas opiniões e ideias sempre construtivas, pela paciência e incentivo e por ter confiado no meu trabalho.

Ao meu co-orientador Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima por ter aceitado a coorientação, pelas discussões produtivas e por todos os ensinamentos e auxílios, sendo de fundamental importância a sua participação no desenvolvimento desta pesquisa.

A UNOESC por ter disponibilizado o laboratório de engenharia civil para refazer as argamassas e o ensaio de resistência à compressão.

À CAPES pelo apoio financeiro que possibilitou total dedicação aos estudos.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite, por seus comentários e sugestões.

A todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente na realização desta pesquisa.

“A melhor coisa que pode fazer é surpreender-se a si próprio.”
Steve Martin

RESUMO

Pesquisas recentes têm demonstrado que o resíduo de cerâmica vermelha possui características que podem ser interessantes na confecção de materiais cimentícios. Objetiva-se, neste trabalho, avaliar a atividade pozolânica do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) finamente moído na produção de cimento Portland. Foram realizados ensaios iniciais para se determinar o tempo ideal de moagem do RCV. Em seguida, realizou-se a caracterização química e física do resíduo, pelos ensaios de microanálise (EDS), difração de Raio – X, análise termogravimétrica (TGA e DTA), perda ao fogo e microscopia eletrônica de varredura. Por fim, foram realizados ensaios de resistência à compressão em diferentes composições de argamassa, variando-se o teor de substituição do resíduo pelo cimento Portland. Através desses ensaios pode-se dizer que o RCV possui atividade pozolânica, pois possui em sua composição química sílica e alumina, e mesmo apresentando grande parte de seus elementos em estado cristalino, observou-se através da análise termogravimétrica que o RCV consome hidróxido de cálcio confirmando a sua atividade pozolânica, fazendo com que futuramente possa ser introduzido na composição dos cimentos compostos.

Palavras-chave: Atividade pozolânica. Cimento portland. Resíduo de cerâmica Vermelha (RCV). Resíduos de construção e demolição.

ABSTRACT

Recent researches have shown that Red Ceramic Waste (RCW) has characteristics that may be interesting in the production of cementitious materials. The objective of this study is to evaluate the pozzolanic activity of the red ceramic waste finely ground in the production of Portland cement. Initial testing was performed to determine the optimal time for grinding of the RCW. Then, there was the chemical and physical characterization of the waste, by tests of microanalysis, X-ray diffractometry, thermogravimetric analysis, loss on fire and scanning electron microscopy. Finally, compressive strength tests were carried out in different compositions of mortar, varying the substitution waste content of the Portland cement. Through these tests, it can be said that the RCW has pozzolanic activity, because it has in its chemical composition silica and alumina, and even presenting a big part of its elements in crystalline state, was observed by thermogravimetric analysis that the RCW consumes calcium hydroxide confirming its pozzolanic activity, making it possible to be introduced in the composition of blended cements.

Keywords: Construction and demolition waste. Pozzolanic activity. Portland cement. Red Ceramic Waste (RCW).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha	38
Figura 2- Fluxograma do programa experimental.....	39
Figura 3- Resíduo de Cerâmica Vermelha	41
Figura 4- Moinho de bolas	43
Figura 5- Difratômetro de Raio - X.....	46
Figura 6- Equipamento de análise termogravimétrica	47
Figura 7- Equipamento microscopia eletrônica de varredura	49
Figura 8- EDS do RCV aos 20 minutos de moagem	56
Figura 9- EDS do RCV aos 20 minutos de moagem	57
Figura 10- EDS do RCV aos 40 minutos de moagem	58
Figura 11- EDS do RCV aos 40 minutos de moagem	58
Figura 12- Difração de Raio X do RCV aos 20 minutos	59
Figura 13- Difração de Raio X do RCV aos 40 minutos	60
Figura 14- Curvas TG e DTA cal/RCV aos 20 min. de moagem aos 3 dias	61
Figura 15- Curvas TG e DTA cal/RCV aos 20 min. de moagem aos 7 dias	62
Figura 16- Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 20 min. de moagem aos 28 dias	62
Figura 17- Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 40 min. de moagem aos 3 dias	62
Figura 18- Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 40 min. de moagem aos 7 dias	63
Figura 19- Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 40 min. de moagem aos 28 dias	63
Figura 20- MEV do RCV aos 20 minutos.....	66
Figura 21- MEV do RCV aos 40 minutos.....	66
Figura 22- MEV argamassa com 10% de RCV aos 7 dias	67
Figura 23- MEV argamassa com 20% de RCV aos 7 dias	67
Figura 24- MEV argamassa com 30% de RCV aos 7 dias	68
Figura 25- MEV argamassa com 10% de RCV aos 14 dias	68
Figura 26- MEV argamassa com 20% de RCV aos 14 dias	69
Figura 27- MEV argamassa com 30% de RCV aos 14 dias	69
Figura 28- MEV argamassa com 10% de RCV aos 28 dias	70
Figura 29- MEV argamassa com 20% de RCV aos 28 dias	70
Figura 30- MEV argamassa com 30% de RCV aos 28 dias	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Requisitos químicos	21
Tabela 2- Requisitos físicos	21
Tabela 3- Exemplos de pozolanas	23
Tabela 4- Composição química de algumas sílicas ativa	25
Tabela 5- Classificação de metacaulim de baixa, média e alta reatividade	28
Tabela 6- Principais compostos do cimento Portland	29
Tabela 7- Dados da indústria de cerâmica vermelha no Brasil	36
Tabela 8- Propriedades físico-químicas	42
Tabela 9- Dosagem das argamassas	51
Tabela 10- Percentual retido acumulado	52
Tabela 11- Massa específica de acordo com o tempo de moagem	53
Tabela 12- Porcentagem retida acumulada e módulo de finura	54
Tabela 13- Microanálise do RCV aos 20 minutos de moagem	57
Tabela 14- Microanálise do RCV aos 40 minutos de moagem	59
Tabela 15- Perda total e a perda de massa devido a desidratação da cal presente nas pastas (H) de cal/RCV com traço de 1:1	64
Tabela 16- Fixação da cal em função do RCV e da idade de cura	65
Tabela 17- Perda ao fogo	65
Tabela 18- Resistência à compressão média das argamassas	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Curva granulométrica	55
Gráfico 2- Resistência à compressão média das argamassas com RCV aos 20 minutos.....	72
Gráfico 3- Resistência à compressão média das argamassas com RCV aos 40 minutos.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
BET	<i>Brunauer, Emmett and Teller</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DRX	Análise de Difração de Raios X
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
DTA	Análise Termo-Diferencial
EDS	Ensaio de microanálise
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
PIB	Produto Interno Bruto
RCV	Resíduo de Cerâmica Vermelha
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
TGA	Análise Termogravimétrica
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UNOESC	Universidade do Oeste de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA	16
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	MATERIAIS POZOLÂNICOS	19
3.1.1	Pozolanas naturais	23
3.1.2	Pozolanas artificiais	24
3.1.2.1	<i>Sílica ativa</i>	24
3.1.2.2	<i>Metacaulim</i>	26
3.2	INTERAÇÕES ENTRE A POZOLANA E O CIMENTO PORTLAND	28
3.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ATIVIDADE POZOLÂNICA	30
3.4	BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS	31
3.5	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	32
3.6	RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA (RCV)	33
3.6.1	Indústria cerâmica	35
3.6.2	Fabricação da cerâmica vermelha	36
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
4.1	MATERIAIS	40
4.1.1	Cimento Portland	40
4.1.2	Cal hidratada	40
4.1.3	Agregado miúdo	41
4.1.4	Resíduo de Cerâmica Vermelha	41
4.1.5	Aditivo hiperplastificante	42
4.1.6	Água de amassamento	42
4.2	MÉTODOS	42
4.2.1	Moagem do Resíduo de Cerâmica Vermelha	42
4.2.2	Caracterização do RCV	45
4.2.2.1	<i>Difração de raio – x</i>	45
4.2.2.2	<i>Análise termogravimétrica</i>	46
4.2.2.3	<i>Perda ao fogo</i>	48
4.2.2.4	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise (EDS)</i>	48

4.2.3	Composição das pastas de cal/pozolana.....	49
4.2.4	Resistência à compressão em argamassas	50
4.2.4.1	<i>Composição dos traços de argamassa</i>	50
5	RESULTADOS	52
5.1	ESCOLHA DO TEMPO DE MOAGEM DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA	52
5.1.1	Finura por peneiramento	52
5.1.2	Massa específica dos sólidos	53
5.1.3	Análise granulométrica	53
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA	55
5.2.1	Microanálise (EDS)	56
5.2.2	Difração de Raio – X	59
5.2.3	Análise termogravimétrica	60
5.2.4	Perda ao fogo	65
5.2.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	66
5.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	71
6	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil consome grandes volumes de recursos naturais e energia e também é uma grande geradora de resíduos, representando hoje em dia um dos principais problemas para as administrações municipais, pois quando gerados e descartados inadequadamente, podem causar grandes impactos ambientais.

De acordo com Serra (2006), existem dois aspectos de sustentabilidade na construção civil: a sustentabilidade do processo produtivo que seriam ações que visam a redução da geração de resíduos e o reaproveitamento de materiais e a sustentabilidade da operação dos edifícios construídos que seria o planejamento para melhorar a utilização da água e da energia.

No Brasil a sustentabilidade começou a ser debatida na ECO-92, realizada no Rio de Janeiro em 1992 e teve como objetivo verificar os avanços em relação às cúpulas anteriores e o que ainda precisava ser feito para que os países tornem-se sustentáveis. Ainda neste encontro foi produzida a Agenda 21 considerada como o resultado mais importante da ECO-92.

Em 2002 foi produzida a Agenda 21 para construção sustentável em países em desenvolvimento. E de acordo com o Ministério do Meio Ambiente a Agenda 21 pode ser definida como um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis, em diferentes bases geográficas, que concilia métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica.

No Brasil em 2013 a indústria de materiais de construção civil vendeu cerca de R\$ 141.065.000,00 milhões de reais, sendo que o material mais vendido foi o cimento, representando 12,1% do total de vendas.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) os maiores impactos ambientais causados pela produção de cimento são a extração de matérias-primas (argila e calcário), o elevado consumo energético e a elevada taxa de emissão de dióxido de carbono.

Neste sentido, buscou-se neste trabalho propor alternativas que contribuam para a minimização desses impactos e a preservação de recursos naturais,

avaliando-se a possibilidade de utilização do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) na composição dos cimentos Portland compostos.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O desenvolvimento econômico e social do Brasil gerou um forte aquecimento no mercado da construção civil e como consequência houve um aumento no volume de resíduos de construção civil nas cidades brasileiras. Pode-se notar, também, que os municípios não estão estruturados para o gerenciamento deste volume significativo de resíduos e para o gerenciamento dos problemas causados (CARNEIRO; BRUM; CASSA, 2001).

Atualmente, as soluções adotadas na maioria dos municípios, são emergenciais, o que é considerado ineficiente. Assim, torna-se necessário buscar estratégias sustentáveis como a reciclagem dos resíduos, fazendo com que se transformem em recursos reutilizáveis.

Em relação aos resíduos de construção civil, quando estes são selecionados, graduados e limpos adequadamente, tornam-se um agregado secundário, que conforme sua origem e tratamento podem ser utilizados em aterro ou em concreto. Isto mostra que um material secundário pode ser de qualidade e economicamente competitivo.

Além da vantagem de baixo custo, deve ser considerada também a preservação do meio ambiente gerada pela reciclagem desse material, sendo que quando sua disposição é feita de maneira inadequada, pode causar vários problemas urbanos como alagamentos, deslizamentos de encostas e doenças. Esta forma de reciclagem do entulho reduz também a degradação ambiental causada pela extração das matérias-primas convencionais.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos.

O primeiro capítulo consta da presente introdução e da importância da realização desta pesquisa.

O segundo capítulo trata do objetivo geral e dos objetivos específicos principais deste trabalho.

No terceiro capítulo encontra-se a fundamentação teórica, onde relatam-se os diferentes tipos de materiais pozolânicos, naturais e artificiais. Apresenta-se também a interação entre a pozolana e o cimento Portland e algumas considerações sobre a atividade pozolânica, além de um breve resumo sobre a indústria e a fabricação da cerâmica vermelha e algumas pesquisas realizadas com a utilização do Resíduo de Cerâmica Vermelha.

O quarto capítulo aborda o programa experimental, onde, é descrito os principais materiais, equipamentos e métodos utilizados para a realização desta pesquisa.

No quinto capítulo encontram-se os resultados obtidos através do programa experimental descrito no quarto capítulo.

As conclusões obtidas deste estudo encontram-se apresentadas no sexto capítulo.

Por fim, o sétimo capítulo apresenta as referências bibliográficas utilizadas como referência para esta pesquisa.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é verificar a atividade pozolânica do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) como uma possível alternativa como adição pozolânica na produção de cimento Portland. Com isso, os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Determinar o tempo adequado de moagem do RCV;
- b) Comparar dois tempos de moagem, um que atenda o exigido pela NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, 2014) que especifica que o material para ser considerado pozolânico deve conter menos de 20% de material retido na peneira #325 (45 μm), e um outro tempo de moagem que deve apresentar valores superiores ao exigido pela norma, no caso, que contenha mais de 20% de material retido na peneira #325;
- c) Realizar a caracterização física e química do RCV; e
- d) Realizar ensaios de resistência em argamassas com diferentes porcentagens de RCV, em substituição ao cimento, em comparação com uma argamassa padrão (sem RCV).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS POZOLÂNICOS

A mistura de cal/pozolana foi usada como material cimentante para construções de estruturas durante todo o império romano. Uma das pozolanas utilizadas foram as cinzas produzidas pela erupção vulcânica do Monte Vesúvio em 79 D.C. que destruiu Pompéia, Herculano e várias outras cidades ao longo da Baía de Nápoles (MEHTA; MALHOTRA, 1996).

Porém, foi na Itália que o termo “pozolana” foi usado pela primeira vez para descrever a cinza vulcânica extraída em Pozuoli, uma aldeia perto de Nápoles. Contudo, por volta de 1500 A.C. na Ilha de Santorini foi encontrado uma cinza natural muito semelhante a de Pozuoli que na época era utilizada para fazer argamassas de cal/pozolana na Grécia, muito antes do termo surgir (MEHTA; MALHOTRA, 1996).

De acordo com os mesmos autores, o tufo vulcânico foi outro material pozolânico amplamente utilizado na Alemanha durante o período romano. Existem também outras evidências de que as cinzas vulcânicas e tufos não foram as únicas fontes de pozolanas utilizadas para as construções de estruturas antigas (MEHTA; MALHOTRA, 1996).

A descoberta e o uso da cal hidráulica (cal impura que continha argila calcinada) durante o século 18 foram os precursores da invenção do cimento Portland em 1824. Devido as características de tempo de pega e de endurecimento mais rápido do cimento Portland, este se tornou rapidamente o material mais utilizado na construção civil ao invés de cimentos de cal/pozolana (MEHTA; MALHOTRA, 1996).

No entanto, devido às considerações tecnológicas, econômicas e ambientais, os materiais pozolânicos continuam sendo utilizadas para a fabricação de cimento Portland e nas indústrias de concreto. Outro ponto que deve ser mencionado é que subprodutos industriais, tais como cinzas volantes de centrais térmicas, e escória bem como sílica ativa de indústrias metalúrgicas, estão sendo cada vez mais

substituídos por pozolanas naturais e argilas calcinadas (MEHTA; MALHOTRA, 1996).

Para desenvolver uma ação cimentante, é evidente que uma pozolana tem de ser misturado com a cal ou com o cimento portland. No entanto, há alguns materiais finamente divididos e não cristalinos ou pouco cristalinos similar as pozolanas, mas contendo cálcio suficiente para formar compostos que possuam propriedades cimentantes após interação com a água. Estes materiais são classificados como cimentante. Um exemplo de material cimentante é a escória de alto forno, constituída essencialmente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e de magnésio. Quando a escória fundida é resfriada rapidamente com uma grande quantidade de água, forma-se um material granular, que é essencialmente vítreo ou não cristalino (MEHTA; MALHOTRA, 1996).

Segundo Lea (1998) os materiais pozolânicos não reagem por si só, mas quando finamente moídos e na presença de água, reagem em temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) formando compostos de silicato de cálcio e aluminato de cálcio. Estes compostos são similares aos que se formão durante a hidratação do cimento. As pozolanas consistem essencialmente das reações SiO_2 e Al_2O_3 . O restante é constituído de Fe_2O_3 e outros óxidos. Os materiais pozolânicos devem ser corretamente preparados (selecionados, homogeneizados, secos e moídos) dependendo do seu estado de produção ou distribuição.

Outra definição dada pela NBR 12653 (ABNT, 2014) é: a pozolana é um material silicoso ou silicoaluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante. Entretanto quando finamente dividida e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades aglomerantes.

Para um material ser considerado pozolânico deve atender as condições descritas na NBR 12653 (ABNT, 2014) que classifica as pozolanas, em três classes (Classe N, Classe C e Classe E), de acordo com sua origem, requisitos químicos e físicos.

A Classe N são pozolanas naturais e artificiais como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. A Classe C são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. E por último a Classe E que são quaisquer pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores.

De acordo com a mesma NBR, os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com os requisitos químicos e físicos estabelecidas na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Requisitos químicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponível em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2014).

Tabela 2 - Requisitos físicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45µm	< 20%	< 20%	< 20%	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

(*) Este método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método descrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.

Fonte: ABNT (2014).

Não existe nenhuma correlação exata entre composição química, finura e o estado vítreo dos materiais pozolânicos. Assim, não deve haver restrições quanto à composição química desses materiais. Pode-se notar, portanto, que a relação entre o estado vítreo e atividade pozolânica é complexa, e que além da composição química dos materiais pozolânicos, as normas deveriam considerar as características físicas e mineralógicas dos materiais (LEA, 1971; MEHTA; MALHOTRA, 1996; PINHEIRO, 2008).

Segundo Lea (1971) a classificação mais aceita é em relação a origem das pozolanas e, portanto, a primeira subdivisão é entre os materiais naturais e artificiais. Os materiais naturais não necessitam de nenhum tratamento além da moagem. Já as pozolanas artificiais resultam das modificações químicas e/ou estruturais de materiais originalmente sem ou com pouca propriedade pozolânica. O último pode ser de certos métodos de produção ou de produtos fabricados a partir de matérias-primas selecionadas.

Existem também outras classificações, entre estas a classificação de Pinheiro (2008) que divide os materiais pozolânicos em dois grandes grupos:

- a) **Pozolanas naturais:** normalmente são de origem vulcânica, também podem ser oriundas de rochas sedimentares ou fósseis. Possuem grande teor de sílica (dióxido de silício – $\text{SiO}_2 \geq 65\%$);
- b) **Pozolanas artificiais:** proveniente de processos industriais, como as escórias, cinzas volantes, entre outros materiais, ou tratamento térmico de alguns tipos de argila.

Porém, existem divergências quanto à classificação das argilas calcinadas, o que varia de um autor para outro. Montanheiro et al. (2002) apresenta exemplos de pozolanas naturais e artificiais (Tabela 3).

Tabela 3 - Exemplos de pozolanas

Pozolanas naturais	Pozolanas artificiais
Rochas vulcânicas ácidas	Escórias ácidas de alto-forno
Tufos vulcânicos	Cinzas volantes
Terras diatomáceas	Resíduos argilosos de folhelhos betuminosos após extração
Arenitos e folhelhos opalinos	Microsílica
Argilitos de argilas mal cristalizadas	Argilas calcinadas (Metacaulinita)

Fonte: Montanheiro et al. (2002).

3.1.1 Pozolanas naturais

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) as pozolanas naturais são aquelas cuja origem é vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (maior que 65% de SiO₂) ou de origem sedimentar, com atividade pozolânica.

E de acordo com Mielenz (1949) citado por Silva (2005) as pozolanas naturais são materiais que possuem atividade pozolânica no estado natural, ou que podem ser facilmente transformadas em pozolanas, como cinzas e tufos vulcânicos, que quando misturados com cal extinta, produzem cimentos para argamassa e concretos que duram até os dias de hoje.

Como pode-se perceber não é fácil classificar as pozolanas naturais, devido a alguns fatores como forma, tamanho e distribuição do tamanho das partículas, densidade, composição química e mineralógica, fatores esses que podem influenciar a atividade pozolânica (PINHEIRO, 2008).

Mehta (1987) citado por Mantuano Netto (2006) também concorda que não é fácil classificar uma pozolana natural, pois raramente apresenta apenas um constituinte reativo com o hidróxido de cálcio, e sua composição e propriedades variam bastante. Porém, baseado no constituinte químico capaz de reagir com o Ca(OH)₂ presente nos materiais, as pozolanas naturais podem ser classificadas em quatro categorias:

- a) Vidros vulcânicos;
- b) Tufos vulcânicos;
- c) Argilas calcinadas; e

d) Sílica opalina (natural ou calcinada).

As argilas calcinadas serão consideradas neste trabalho como pozolanas artificiais, e serão abordadas no item 3.1.2.2 – Metacaulim.

3.1.2 Pozolanas artificiais

As pozolanas artificiais segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) são materiais resultantes de tratamento térmico ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica, e podem ser divididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais.

Outra definição seria que as pozolanas artificiais são argilas de qualquer tipo submetidas a altas temperatura para desidratação, porém, em temperaturas abaixo do início da fusão. São conhecidos também como materiais pozolânicos os subprodutos industriais tais como as cinzas volantes, a cinza de casca de arroz, a sílica ativa, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As adições artificiais são produzidas através da queima desse material a temperaturas que variam entre 500 e 900 °C, alterando a estrutura cristalina, que seria a criação da instabilidade da estrutura interna dos minerais argilosos, causando assim um rearranjo energeticamente instável. Este procedimento auxilia o aumento da porosidade das partículas e, assim, sua superfície ativa. Porém, a temperatura de queima das argilas deve ser inferior à de fusão. Através da difração de raios X, Silva (2005) observou que as adições pozolânicas artificiais possuem estrutura amorfa, pois o espectograma não apresentava picos característicos de planos cristalinos nos ângulos de difrações.

3.1.2.1 Sílica ativa

A sílica ativa, também conhecida como microssílica, é um subproduto do processo de fabricação de ferro-silício ou silício metálico, e em alguns casos, em ligas de ferro-cromo e ferro-manganês (PINHEIRO, 2008).

De acordo ainda com o mesmo autor a produção se dá em fornos elétricos de fusão, tipo arco-voltaico, onde ocorre à redução do quartzo a silício pelo carbono a altas temperaturas em torno de 2000 °C. Durante o processo é liberado o monóxido de silício gasoso (SiO), que se condensa quando entra em contato com temperaturas mais baixas, formando o dióxido de silício (SiO₂).

A sílica ativa é composta basicamente de sílica, SiO₂, com teores que variam entre 85 e 90%, em função do tipo de liga a ser produzida. Quanto maior o teor de silício empregado para a fabricação das ligas maior o teor de sílica amorfa da sílica ativa. Além disso, a sílica ativa possui partículas com diâmetro entre 01 e 02 µm que é essencialmente, mas não completamente, de sílica amorfa. Se não for utilizado um aditivo redutor de água, pode haver um aumento na demanda de água do cimento, além de que devido a sua finura (15000 a 20000 m²/Kg obtido através do método BET) apresenta uma tendência para se aglomerar e por isso deve-se ter um cuidado especial para dispersá-lo quando incorporado ao cimento (AITCIN, 2000 citado por ARAÚJO et al., 2006; LEA, 1998). A Tabela 4 apresenta a composição química de algumas sílicas ativa.

Tabela 4 - Composição química de algumas sílicas ativa

	Silício cinza	Ferro-silício cinza	Ferro-silício branco
SiO ₂	93,7	87,3	90,0
Al ₂ O ₃	0,6	1,0	1,0
CaO	0,2	0,4	0,1
Fe ₂ O ₃	0,3	4,4	2,9
MgO	0,2	0,3	0,2
Na ₂ O	0,2	0,2	0,9
K ₂ O	0,5	0,6	1,3
Perda na queima	2,9	0,6	1,2

Fonte: Aitcin (2000) citado por Araújo et al. (2006).

Quando adicionada ao concreto a sílica ativa, produz reações pozolânicas, alterando assim a microestrutura do material. A reação do SiO₂ com o Ca(OH)₂ acontece de forma rápida e pouco variável. Assim, em pouco tempo ganha resistência e baixa permeabilidade, ao contrário das pozolanas naturais. Por causa da redução do tamanho das partículas, a sílica ativa produz o efeito microfíler, que

preenche os vazios entre os grãos de cimento e pasta, atuando como pontos de nucleação e melhorando a aderência pasta-agregado (DAL MOLIN, 2005).

De acordo com Mendes (2002) entre as adições minerais a sílica ativa atualmente é a mais utilizada para a produção de concretos de alto desempenho, por possuir características físico-químicas, que lhe conferem uma alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland e proporcionam um melhor empacotamento das partículas de cimento.

Pinheiro (2008) cita ainda as melhorias que a utilização da sílica ativa causa, como: maior resistência mecânica, proteção da armadura, retenção de água, mais pontos de nucleação, redução do volume de vazios, elevada resistência à abrasão, maior resistência a altas temperaturas (concretos aluminosos) e menor permeabilidade.

3.1.2.2 *Metacaulim*

O metacaulim é considerado um material pozolânico, que apresenta em sua estrutura pouca ou nenhuma organização cristalina, sendo um material predominantemente amorfo e que em presença do clínquer de cimento Portland, produzem compostos mais estáveis e resistentes. O seu efeito pozolânico é tão maior quanto maior for sua qualidade e finura, porém as características dos outros componentes, principalmente do cimento Portland, também exercem grande influência na eficácia do metacaulim (ROCHA, 2005).

Mehta (1987) citado por Pinheiro (2008) define ainda que o metacaulim nada mais é que uma adição mineral produzida a partir da calcinação do rejeito de argilas caulínicas e caulins em temperaturas entre 600 e 1000 °C, fazendo com que a estrutura cristalina dos silicatos presentes na argila seja alterada, tornando-se compostos amorfos e desordenados, que reagem com a cal, à temperatura ambiente. No entanto, nem todas as argilas calcinadas apresentam comportamento pozolânico, sendo o caso das argilas compostas por grande quantidade de minerais muito cristalinos, como quartzo e feldspato, fazendo com que o material não reaja com a cal.

Em geral o metacaulim é amplamente utilizado como adição em concretos e produtos à base de cimento Portland. Por este motivo, é importante que o metacaulim seja produzido em larga escala para viabilizar o seu uso mantendo a qualidade e homogeneidade sempre alta e dentro dos parâmetros estipulados por norma. Geralmente a produção do metacaulim envolve as seguintes etapas (ROCHA, 2005; MANTUANO NETTO, 2006):

- a) Prospecção de argila caulinítica;
- b) Beneficiamento e eliminação de impurezas;
- c) Secagem;
- d) Calcinação;
- e) Moagem e micronização (com seleção granulométrica).

O metacaulim pode ser classificado em função da sua reatividade, como de baixa, média ou alta reatividade. Esta classificação é feita em função do nível de pureza, realizados pelos ensaios de fluorescência de raios – X, difração de raios – X e EDS e outros parâmetros como área superficial específica ou perda ao fogo. Sendo que não existe norma ou especificação rígida em relação a esta classificação (ROCHA, 2005; MANTUANO NETTO, 2006).

A Tabela 5 resume os principais parâmetros de caracterização físico-química do metacaulim de alta reatividade, como uma tentativa de classificá-lo pelo nível de efeito pozolânico com o cimento Portland, sugerida por (ROCHA, 2005).

Tabela 5 - Classificação de metacaulim de baixa, média e alta reatividade

Parâmetros	Unidade	Nível de reatividade do Metacaulim		
		Baixa	Média	Alta
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	%	> 70	> 80	> 90
Fe ₂ O ₃	%	--	--	< 5,0
Na ₂ O solúvel	%	< 0,1	< 0,1	< 0,1
K ₂ O solúvel	%	< 0,5	< 0,5	< 0,1
TiO ₂	%	< 1,5	< 1,5	< 1,5
MgO	%	< 1,0	< 1,0	< 1,0
CaO	%	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Outros compostos	%	< 0,5	< 0,5	< 0,1
Perda ao fogo	%	< 10,0	< 7,0	< 4,0
Relação Al ₂ O ₃ / SiO ₂		--	--	0,70 a 0,90
Atividade pozolânica com cal	Mpa	> 6,0	> 10,0	> 14,0
Atividade pozolânica com cimento	%	> 75	> 85	> 90

Fonte: Rocha (2005).

Com a moagem do material é possível reduzir o tamanho das partículas a valores inferiores a 5 µm, assim sendo denominada por alguns autores como metacaulim de alta reatividade. Fazendo com que esse material possa substituir parte do cimento no concreto aumentando a sua durabilidade e resistência. O metacaulim de alta reatividade também pode ser obtido do resíduo proveniente da indústria de cobertura de papel, que produz um caulim beneficiado de extrema finura, brancura e pureza. O termo também é utilizado para distinguir o produto da calcinação de argilas extremamente finas, com alto teor de caulinita e material amorfo, de outras, proveniente da calcinação de argilas ricas em fases pozolanicamente inertes (SOUZA; DAL MOLIN, 2002).

3.2 INTERAÇÕES ENTRE A POZOLANA E O CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é constituído por um certo número de compostos cujas reações com a água dão origem ao processo de endurecimento (VIEIRA, 2005). São apresentados na Tabela 6 os principais compostos desse aglomerante.

Tabela 6 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em Óxidos	Abreviações
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A
FerroaluminatoTetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF

Fonte: Vieira (2005).

Esses compostos ao se hidratarem, cristalizam-se em três fases distintas: silicatos de cálcio hidratados (CSH), cristais de hidróxido de cálcio (CH) e sulfoaluminatos de cálcio.

A fase silicato de cálcio hidratado (CSH) constitui cerca de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo responsável pela alta resistência mecânica à compressão. Os cristais de hidróxido de cálcio (CH) são grandes e frágeis, constituindo de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada, e dependendo da sua quantidade torna a pasta suscetível à ataques químicos. O CH não contribui para a resistência mecânica da pasta endurecida. E os sulfoaluminatos de cálcio ocupam cerca de 20 a 15% do volume de sólidos da pasta endurecida (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os materiais pozolânicos reagem com a cal, formando compostos aglomerantes. Isso ocorre pelo fato de o silício e o alumínio presentes na sua composição se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente. Sendo que quanto maior for o desarranjo estrutural do material e a sua instabilidade em meio básico, mais intensamente será a reação pozolânica (FARIAS FILHO; ROLIM; TOLEDO, 2000).

A reação pozolânica provoca a redução da espessura da zona de transição promovendo o preenchimento dos poros, melhorando a resistência e reduzindo a permeabilidade (VIEIRA, 2005).

De acordo com Mehta (1987) citado por Mantuano Netto (2006) a reação pozolânica ocorre de forma lenta, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência e o calor de hidratação associado a essa reação. Por outro lado, a hidratação do C₃S do cimento Portland é rápida e, portanto, a taxa de desenvolvimento da resistência e o calor de hidratação são altos. Nota-se ainda que

a reação de hidratação do cimento produz hidróxido de cálcio, enquanto a reação pozolânica consome.

3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ATIVIDADE POZOLÂNICA

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) o índice de atividade pozolânica é um dos requisitos físicos para a classificação de um material como sendo pozolânico. Sendo assim, para que um material possua atividade pozolânica, o material deve reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias. Para a determinação do índice de atividade pozolânica a ABNT estabelece alguns métodos, através das seguintes normas:

- a) NBR 5751 (ABNT, 2012): Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio;
- b) NBR 5752 (ABNT, 2014): Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias; e
- c) NBR 5753 (ABNT, 2010): Cimento Portland – Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico.

A NBR 5751 (ABNT, 2012) e a NBR 5752 (ABNT, 2014) determinam os índices de atividade pozolânica comparando a resistência entre corpos de prova originais de cal ou cimento Portland e amostras com substituição por material pozolânico. A NBR 5753 (ABNT, 2010) utiliza métodos químicos para determinação da atividade pozolânica, assim buscando determinar o consumo de hidróxido de cálcio da amostra.

De acordo com Rego (2004) é difícil encontrar uma metodologia que sirva para todos os tipos de pozolanas, que seja rápida e precisa e que seus resultados possam ser relacionados com as características do material. Assim, a atividade pozolânica deve levar em consideração as características químicas, morfológicas, e físicas do material, e a resistência mecânica dos produtos da reação pozolânica com a cal ou com o cimento.

Outros métodos segundo Matos Neto (2013) estão sendo utilizados para determinar a atividade pozolânica dos materiais, tanto sobre a pozolana isolada, quanto em misturas de pozolana e cimento Portland. São os ensaios utilizando métodos instrumentais, como: difração de raios x para a caracterização das fases cristalinas presentes, a espectrometria de fluorescência de raios x para determinação semi-quantitativa da composição química, a análise termogravimétrica que indica o consumo de hidróxido de cálcio, e a microscopia eletrônica de varredura.

3.4 BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS

Os benefícios decorrentes da utilização de adições minerais nas indústrias de cimento e concreto podem ser divididos em três categorias: benefícios da utilização na engenharia, benefícios econômicos e os benefícios ambientais (MEHTA; MALHOTRA, 1996).

- a) Benefícios da utilização na engenharia: Primeiramente, a incorporação de partículas finamente divididas em misturas de concreto tende a melhorar a trabalhabilidade e reduzir a quantidade de água necessária para uma determinada consistência (exceto para materiais com uma área superficial muito alta, como a sílica ativa). Em segundo lugar, há um aumento na resistência final, impermeabilidade e durabilidade em relação aos ataques químicos. E em terceiro lugar, pode ocorrer uma melhora da resistência a retração devido o cimento composto possuir menor calor de hidratação.

- b) Benefícios econômicos: Geralmente, o cimento Portland é o componente mais caro do concreto. É um material que consome muita energia e que nos últimos anos vem apresentando um aumento nos seus custos, o que acaba consequentemente interferindo nos custos da produção do cimento tornando-o mais caro. Por outro lado, a maioria das pozolanas e dos materiais cimentícios em uso hoje são produzidos pela indústria, que requerem relativamente pouco ou nenhum gasto elevado de energia para utilização como adições minerais. Obviamente, quando utilizado em substituição parcial

ao cimento, geralmente entre 20 a 60% em relação a sua massa, as adições minerais podem resultar em economia de energia e assim em seu custo final.

- c) Benefícios ambientais: O volume total de pozolanas e de subprodutos cimentícios gerados a cada ano por usinas termelétricas e fornos metalúrgicos é superior a 500 milhões de toneladas, sendo que muitos desses subprodutos contêm elementos tóxicos que podem ser perigosos para a saúde humana se não forem descartadas de maneira segura. Se depositados em lagos, córregos ou aterros e utilizados como base de estradas, podem provocar riscos ao ambiente, pois os elementos tóxicos podem infiltrar-se pelo solo e contaminar o lençol freático. Uma das maneiras mais adequadas para utilização das adições minerais é nas indústrias de concreto e cimento porque a maior parte dos metais nocivos podem ser incorporados com segurança nos produtos de hidratação do cimento. Além disso, cada tonelada de cimento Portland produzido é acompanhada por uma quantidade semelhante de dióxido de carbono como um subproduto, que é libertado para o ambiente. Isto significa que a produção de cimento Portland hoje de 1 bilhão de toneladas/ano, é responsável por liberar quantidade considerável de CO₂ no ambiente, que é um dos fatores para o efeito "estufa".

3.5 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

A Resolução 307 Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002) define os resíduos de construção civil como sendo aqueles provenientes de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e também os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras.

A Resolução 307 CONAMA (2002) considera ainda que existe uma grande heterogeneidade dos resíduos que são gerados em uma obra, devido às características específicas de cada cidade ou região tais como geologia, morfologia,

disponibilidade dos materiais de construção e desenvolvimento tecnológico. Classifica os resíduos de construção civil das seguintes formas:

Classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.

Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como produtos oriundos do gesso.

Classe D – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

3.6 RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA (RCV)

De acordo com Wada (2010), quando se incorpora resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto ocorre um aumento na resistência e no módulo de elasticidade do concreto. O material cerâmico triturado também pode ser utilizado em concretos para corrigir possíveis falhas na distribuição granulométrica.

Siqueira (2012) estudou a análise de retenção de água e do tempo de pega de argamassas fabricadas com substituição parcial de cimento Portland por rejeitos da indústria cerâmica. A autora chegou a várias conclusões, entre uma delas é que em relação à plasticidade e consistência, as argamassas mostraram que ao

substituir o resíduo cerâmico tem-se uma pasta gradativamente mais seca. Outro resultado interessante é que com a substituição de cimento por resíduo cerâmico, a argamassa apresentou uma maior retenção de água, não apresentando assim tantas retrações. E em relação ao tempo de pega das pastas, o resíduo cerâmico pode ser considerado um acelerador de pega, pois ao aumentar a sua quantidade, o tempo de pega é reduzido em aproximadamente 2 horas o que diminui também o tempo de trabalhabilidade.

Lavat, Trezza e Poggi (2009) estudaram o resíduo cerâmico para fabricação de cimento, como adição pozolânica. Foram utilizados três materiais diferentes: não esmaltado, natural e o esmaltado. A mineralogia dos resíduos foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de difração de raios x (DRX) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). O tamanho das partículas foi verificado por granulometria a laser. Após serem caracterizados, foram realizados os testes de atividade pozolânica e Fratini. A evolução da hidratação da mistura cimento/resíduo foi analisada por DRX e FTIR. Os autores chegaram à conclusão que a presença de feldspato e quartzo não interfere na atividade pozolânica dos resíduos e os íons metálicos presentes no esmalte não interfere nas propriedades gerais dos mesmos, permitindo que os diferentes materiais utilizados para os resíduos possam ser triturados juntos. E que os resíduos são adequados para a substituição parcial até 20 a 30% em peso de cimento sem um efeito prejudicial sobre a resistência.

Ay e Ünal (2000) estudaram as propriedades pozolânicas de resíduos cerâmicos moídos e o tempo de pega, estabilidade volumétrica, tamanho de partículas, densidade e superfície específica de cimento Portland contendo estes resíduos em taxas de 25%, 30%, 35% e 40%. Os autores observaram que os resíduos cerâmicos possuem atividade pozolânica e que podem ser adicionados ao cimento Portland até 35%.

Mendes e Borja (2007) notaram que a adição de resíduos de cerâmica vermelha em argamassas causou um aumento do índice de consistência, também puderam notar que quanto maior a adição de resíduos, menor é a densidade de massa.

3.6.1 Indústria cerâmica

De acordo com o Ministério de Minas e Energia – MME (2011) a cerâmica vermelha também é conhecida como cerâmica estrutural e faz parte do setor dos minerais não metálicos da indústria da Transformação Mineral.

Este setor é composto por cimento, cerâmica vermelha, cerâmica de revestimento, coloríficos, louças sanitárias, cal, gesso, vidros, concreto, fibrocimento, e outros materiais como os refratários, abrasivos, louça de mesa e sanitária. Em 2011, o PIB da indústria da transformação de não metálicos totalizou US\$ 20,3 bilhões, com um aumento de 8% em relação ao ano anterior. O setor participou com 0,82% do PIB Nacional e 3% do PIB Industrial (MME, 2011).

E ainda segundo a Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM (2014) a indústria de cerâmica vermelha compreende materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil, como tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas além de utensílios de uso doméstico e de adorno.

As indústrias geralmente se localizam perto das jazidas e dos centros consumidores, sendo a grande maioria das indústrias cerâmicas familiares (olarias, em grande parte não incorporadas às estatísticas oficiais). Existem também as indústrias de pequeno e médio porte, com deficiência de mecanização e gestão, e indústrias de médio e grande porte (em escala de produção) de tecnologia moderna. Algumas iniciativas vêm sendo tomadas, tanto por parte do setor empresarial como governamental, para o desenvolvimento das indústrias de cerâmica vermelha (MME, 2011).

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2014), estima-se que existam no país 6903 empresas, responsáveis pela geração de 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos com um faturamento anual de R\$ 18 bilhões (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados da indústria de cerâmica vermelha no Brasil

	Nº Empresas aproximado	% Aproximado por área	Produção (Nº de peças/mês)	Consumo de argila (Ton/Mês)
Blocos/Tijolos	4346	63	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2547	36	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	10	0,1	325,5 Km	-

Fonte: Anicer (2014).

O Brasil apresenta um consumo médio *per capita* de 457 peças/hab. a região Sul registra a maior participação com demanda de 719 peças/hab., seguida pela região Sudeste com 461, o Centro-Oeste com 436, Nordeste 368 e por último o Norte 294. O consumo e a produção de cerâmica vermelha do país são um dos maiores do mundo, ficando atrás apenas da China e Índia (MME, 2011).

3.6.2 Fabricação da cerâmica vermelha

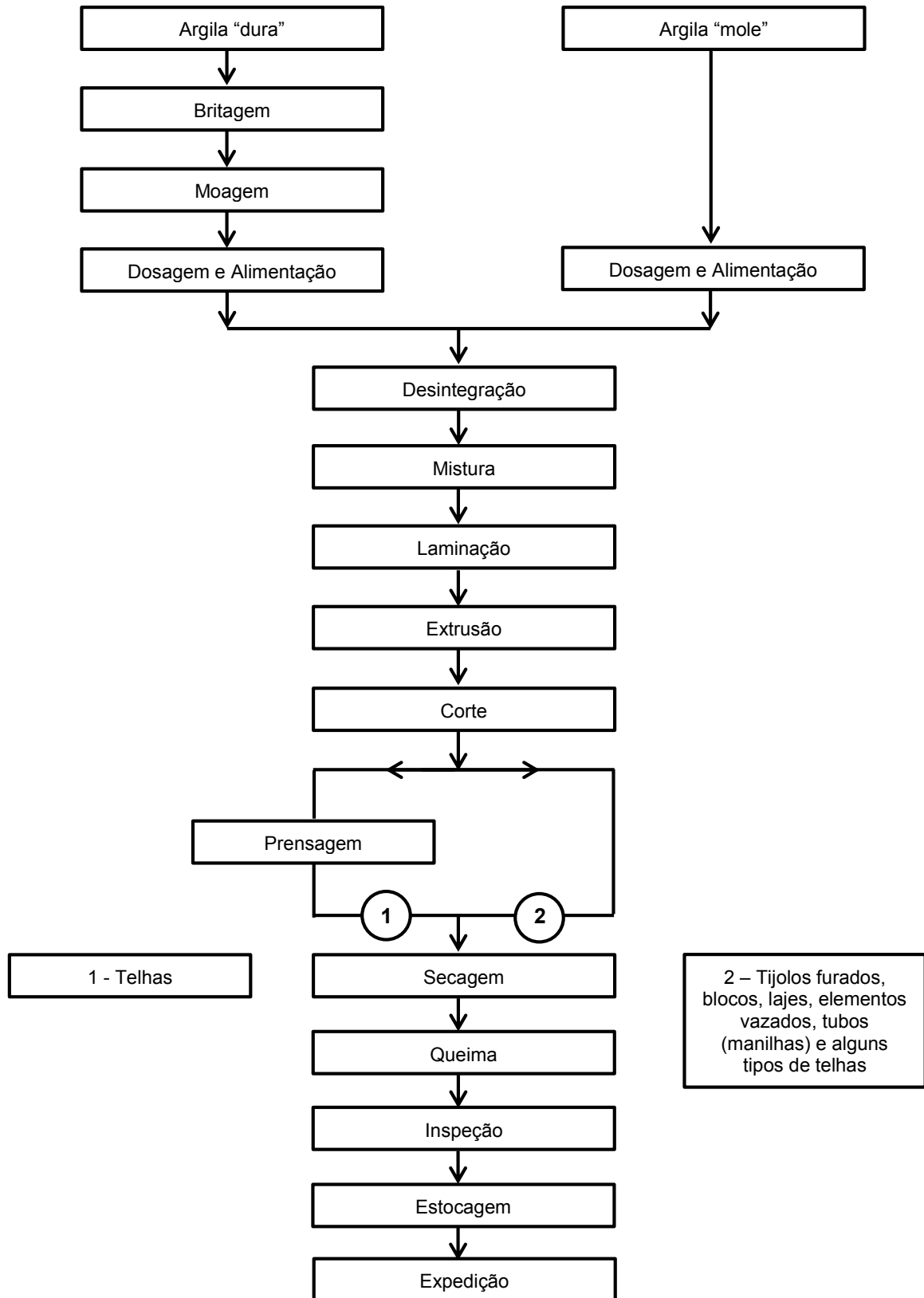
De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE (2008) a indústria cerâmica é dividida em duas fases. A primária que envolve exploração e exploração da argila, e a secundária que seria a transformação que resulta no produto final.

A matéria-prima básica da cerâmica vermelha é a argila comum, e a massa resultante pode ser denominada de simples ou natural, sendo composta por matéria orgânica, impurezas e minerais de ferro. Essa formulação de massa busca, uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade resultando em uma melhor trabalhabilidade e resistência durante a queima. A preparação da massa é feita, geralmente, por meio da mistura de uma argila gorda de alta plasticidade, granulometria fina e composta essencialmente de argilominerais, e com uma argila magra que é rica em quartzo e menos plástica, podendo ser considerada um redutor de plasticidade (MOTTA; ZANARDO; CABRAL JUNIOR, 2001). As etapas do processo de fabricação da cerâmica vermelha podem ser observadas no fluxograma apresentado pela (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA– ABCERAM 2014).

Resumidamente, as etapas de fabricação de cerâmica vermelha, são essas (SEBRAE, 2008):

- a) Preparação da massa: material é separado, formam-se montes de argila para serem homogeneizados;
- b) Caixão alimentador: separação da quantidade necessária à produção, que em seguida é levada para desintegradores;
- c) Desintegradores: nessa fase a umidade deverá variar entre 16 e 25%, para evitar perda de eficiência, não desintegrando os blocos de argila adequadamente;
- d) Misturador: em seguida, em um misturador, a mistura é homogeneizada;
- e) Laminador: a massa é então amassada em formato de lâminas e em seguida levada à maromba;
- f) Extrusora ou maromba: que compacta uma massa plástica, numa câmara de alta pressão, a vácuo, contra uma forma (molde) no formato do produto desejado;
- g) Cortador: um fino cabo de aço corta a peça na dimensão desejada;
- h) Secagem: durante a secagem as peças reduzem de 20 a 30% de teor de umidade para 5%. A secagem pode ser natural ou forçada;
- i) Queima: peças são submetidas aos fornos para adquirirem as características e propriedades desejadas, que podem ser realizados em diferentes tipos de fornos;
- j) Estocagem e expedição: depois de retirados do forno, são inspecionados, e retira-se as peças com defeitos.

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha



Fonte: ABCERAM (2014)

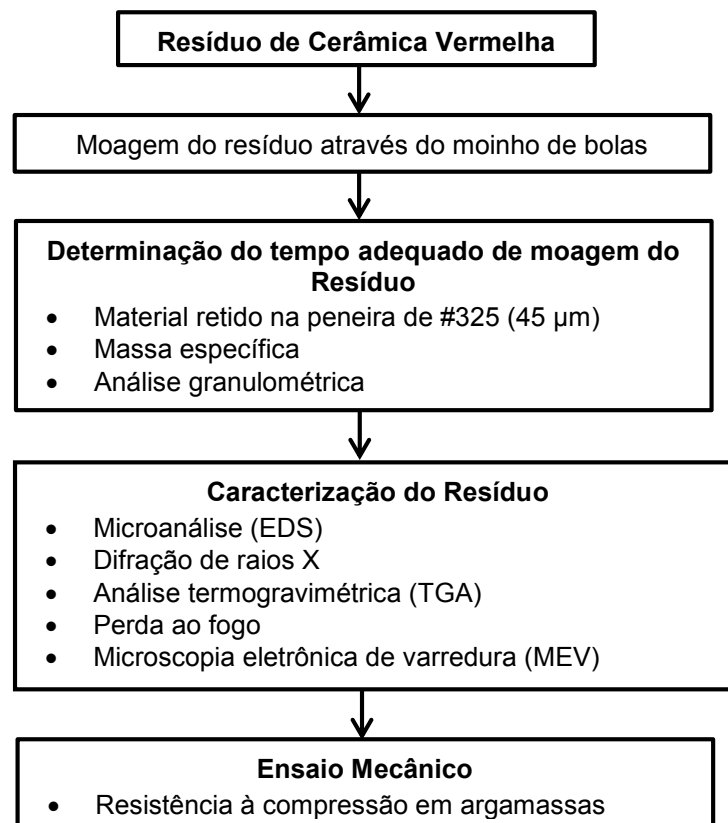
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos empregados no desenvolvimento experimental desse estudo para avaliar as propriedades pozolânicas do Resíduo de Cerâmica Vermelha.

Primeiramente realizou-se a moagem do RCV através do moinho de bolas e a cada intervalo de tempo pré-estabelecido foi retirado uma amostra. Cada amostra passou pelo ensaio de material retido na peneira de #325 (45 μm), massa específica e análise granulométrica. Com isso foram escolhidos dois tempos de moagem, um que atendia as condições da NBR 12653 (ABNT, 2014), e o outro tempo, 20 minutos de moagem que apresentou valores superiores ao exigido pela norma.

Após, comparou-se a caracterização dos RCVs através de ensaios químicos, físicos e mecânicos. A Figura 2 abaixo apresenta as principais etapas metodológicas usadas no desenvolvimento dessa pesquisa.

Figura 2 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Do próprio autor.

4.1 MATERIAIS

Os principais materiais utilizados foram:

- a) Cimento Portland;
- b) Cal hidratada;
- c) Agregado miúdo;
- d) Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV);
- e) Aditivo hiperplastificante;
- f) Água de amassamento.

4.1.1 Cimento portland

Utilizou-se neste estudo o cimento Portland CP V – ARI produzido pela empresa Votorantim. Optou-se por este tipo de cimento pelo fato de não possuir nenhuma adição pozzolânica, assim diminuindo o risco de interferência na análise da atividade pozzolânica do RCV. O CP V – ARI é composto por silicatos de cálcio, alumínio e ferro, sulfato de cálcio e filler carbonático.

4.1.2 Cal hidratada

De acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003) a cal hidratada é um pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Ainda de acordo com a norma a cal hidratada é dividida em três classes: CH I, CH II e CH III. Neste estudo, a cal utilizada foi a cal hidratada CH III fabricada pela empresa Votorantim, composta por hidróxido de cálcio e magnésio, disponível no laboratório de engenharia civil da UNESP de Ilha Solteira/SP.

4.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado para a confecção das argamassas para o ensaio de resistência à compressão foi caracterizado de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e disponibilizado pelo laboratório de engenharia civil da Universidade do Oeste de Santa Catarina - UNOESC de Joaçaba/SC. Através desses ensaios foi possível classificar o agregado miúdo como sendo de granulometria fina com módulo de finura de 1,55 e massa específica de $2,66 \text{ g/cm}^3$.

4.1.4 Resíduo de cerâmica vermelha

Os Resíduos de Cerâmica Vermelha (RCV) foram fornecidos por uma indústria cerâmica da região e foram constituídos por peças defeituosas, que não apresentavam qualidade no acabamento, conformidade dimensional ou proveniente de quebras no processo produtivo. Na Figura 3 pode-se observar que o resíduo já encontrava-se triturado, porém não com a finura desejada. Portanto, após sua coleta foram moídos em um moinho de bolas e posteriormente submetidos a ensaios para determinação do tempo adequado de moagem do RCV, os quais encontram-se descritos no item 4.2.1.

Figura 3 - Resíduo de Cerâmica Vermelha



Fonte: Do próprio autor.

4.1.5 Aditivo hiperplastificante

O aditivo utilizado na confecção dos traços de argamassa foi o TEC-FLOW 8000. A sua composição química é a base de policarboxilato modificado, com faixa de concentração de 49%. Optou-se por utilizar este aditivo hiperplastificante para conseguir manter fixa a trabalhabilidade das argamassas sem alterar a relação água/aglomerante. Na Tabela 8 é possível verificar as propriedades físico-químicas do aditivo.

Tabela 8 - Propriedades físico-químicas

Estado físico	Líquido
Cor e odor	Amarelo turvo e odor característico
Peso específico	1,10 +/- 0,02 g/cm ³
Voláteis	51% em peso
Ph	5,5 +/- 1,0
Solubilidade em água	Totalmente solúvel em água

4.1.6 Água de amassamento

Para a preparação das argamassas para o ensaio de resistência à compressão, utilizou-se água potável do sistema de abastecimento público da cidade de Joaçaba – SC.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Moagem do resíduo de cerâmica vermelha

Primeiramente foi necessário fazer a moagem do RCV, para em seguida, ser realizada a sua caracterização. O objetivo dessa parte da pesquisa é determinar o tempo ideal de moagem do resíduo. Para isso, determinou-se que a cada 10 minutos uma amostra seria retirada para avaliação, resultando nos seguintes tempos: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos. A Figura 4 ilustra o equipamento utilizado para a moagem do RCV.

Figura 4 - Moinho de bolas



Fonte: Do próprio autor.

Um dos pontos de partida, portanto, dessa pesquisa é escolher um tempo de moagem que apresente as características exigidas pela NBR 12653 (ABNT, 2014) que sugere que o material deve apresentar um percentual menor que 20% retido na peneira #325 (45 μm) e um outro tempo de moagem, que apresente valores superiores ao exigido pela norma.

a) Finura por peneiramento

Para esse ensaio foram adotadas as orientações da NBR 15894-3 (ABNT, 2010) que especifica um método de ensaio para determinação da finura do metacaulim por meio da peneira com abertura de malha de 45 μm , sendo o metacaulim substituído pelo resíduo em estudo, o RCV, como indica a NBR 12653 (ABNT, 2014).

O ensaio consiste em pesar ($20 \pm 0,1$) g do resíduo e transferir para um recipiente com aproximadamente 400 ml de água e agitar até dispersão total do material.

Em seguida, colocar a peneira de malha de 45 μm sob o fluxo de água e verter os 400 ml de água com o resíduo lentamente sobre a malha, e executar movimentos circulares (plano horizontal) na peneira, de modo que a água incida sobre toda a amostra e a tela da peneira durante pelo menos 10 minutos.

E por fim, transferir cuidadosamente o material retido com auxílio de uma pisseta com água para um recipiente e secar em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até massa constante.

b) Massa específica

Para a determinação da massa específica do RCV, seguiram-se os procedimentos descritos na norma NBR NM 23 (ABNT, 2001). Foram separadas duas amostras do RCV com 50g cada. Em seguida foi preenchido com querosene o frasco com o auxílio do funil, até o nível compreendido entre as marcas correspondentes a zero e 1 cm^3 , em seguida secado o interior do frasco acima do nível do líquido.

O frasco foi colocado no banho de água em posição vertical e mantido submerso durante uns 30 min, para equalização das temperaturas dos líquidos do frasco e do banho. E em seguida foi registrada a primeira leitura (V_1) com aproximação de $0,1 \text{ cm}^3$.

Logo após foi adicionada uma amostra de 50g do material em pequenas porções no frasco de “Le Chatelier”, com o auxílio do funil cuidando para que não ocorresse aderência de material nas paredes internas do frasco, acima do nível do líquido.

E em seguida foi tampado o frasco e feito suaves movimentos em círculos, até que não subisse mais bolhas de ar na superfície do líquido. E por fim foi registrada a leitura final (V_2).

c) Análise granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica de cada amostra de RCV foi realizada por peneiramento mecânico. Inicialmente as amostras foram secas na estufa até constância de massa, em seguida foram expostas a temperatura ambiente e determinadas suas massas.

Para o peneiramento foram encaixadas as peneiras 300, 150 e 75 μm e fundo de modo que formassem um único conjunto de peneiras, em ordem crescente da base para o topo. Cada amostra foi colocada sobre a peneira superior do conjunto, sendo promovida a sua agitação mecânica, por aproximadamente 10 minutos.

O material retido na peneira foi removido com uma escova para uma bandeja. O material removido pelo lado interno era considerado como retido e o desprendido na parte inferior como passante. Por fim foi determinada a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto.

4.2.2 Caracterização do RCV

Existem várias técnicas para a caracterização de materiais cerâmicos. A seguir, serão citadas as técnicas consideradas importantes e que serão realizadas neste estudo na determinação dos parâmetros físicos e químicos do Resíduo de Cerâmica Vermelha.

Para a caracterização química foram realizados os seguintes ensaios: difração de raios x, análise térmica, microanálise e perda ao fogo, e para a caracterização física foi realizado a microscopia eletrônica de varredura (MEV) do resíduo e das argamassas de cimento/pozolana (RCV).

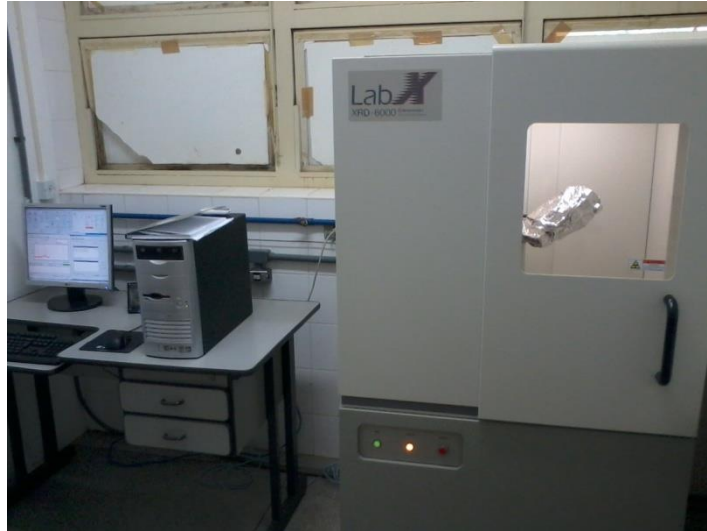
4.2.2.1 Difração de raio – x

Segundo Rocha (2005) esta técnica analisa o nível de cristalinidade da substância, permitindo identificar as fases quanto ao seu arranjo atômico e a quantificar os elementos presentes desde que em faixa adequada de concentração. As suas principais vantagens são: à determinação do tipo de ligação química dos elementos presentes, análise quantitativa, imagem química e elementar da amostra e ainda podendo detectar materiais condutores e não condutores de eletricidade.

O difractômetro utilizado encontra-se no Laboratório de física e química da UNESP de Ilha Solteira, sendo o aparelho da marca Shimadzu modelo XRD – 6000 (Figura 5). De acordo com a empresa o XRD – 6000 analisa os estados cristalinos sob condições normais de atmosfera, sendo considerado um método não destrutivo.

Para o ensaio foram utilizados suportes de vidro para não interferir nos resultados das amostras e os registros foram realizados em um intervalo de 2θ entre 5° e 60° .

Figura 5 - Difractômetro de raio - x



Fonte: Do próprio autor.

4.2.2.2 *Análise termogravimétrica*

De acordo com Rocha (2005) os ensaios de análise térmica têm sido utilizados frequentemente na caracterização dos materiais de uma forma geral, principalmente os cerâmicos. Existem várias técnicas de análise térmica, tais como a termo-diferencial (DTA), calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise termogravimétrica (TGA), dilatométrica, entre outras. Sendo que para materiais cerâmicos, opta-se pelos ensaios TGA e DTA.

Este método segundo Rocha (2015) é realizado através de equipamentos muito sensíveis, que medem a perda ou ganho de massa quando a amostra em estudo é aquecida a uma taxa controlada. Geralmente, a perda de massa está associada à perda de água, e o ganho de massa, à oxidação do material. O resultado é uma curva denominada termograma, onde se podem interpretar os valores de perdas e/ou ganhos de massa em função das temperaturas aplicadas.

Este ensaio pode ser utilizado para avaliar a atividade pozolânica de pastas de cal/pozolana e cimento/pozolana, sendo que esta técnica permite determinar a perda de massa devida às reações de hidratação dos compostos formados

(TASHIMA, 2012). As reações de hidratação que sofrem as pastas de cimento/pozolana e as pastas de cal/cimento são:

- $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} (\cong 550^\circ\text{C});$
- $\text{CSH} \rightarrow \text{CS} + \text{H}_2\text{O} (\cong 120\text{-}150^\circ\text{C});$
- $\text{CAH} \rightarrow \text{CA} + \text{H}_2\text{O} (\cong 150\text{-}240^\circ\text{C});$
- $\text{CASH} \rightarrow \text{CAS} + \text{H}_2\text{O} (\cong 150\text{-}240^\circ\text{C}).$

Onde:

CSH são silicatos de cálcio hidratado;

CAH são aluminatos de cálcio hidratado;

CASH são silicoaluminatos de cálcio hidratado.

O equipamento utilizado para este ensaio foi um TGA modelo SDT Q600 da marca TA *Instruments* (Figura 6), disponível no Laboratório de física e química da UNESP de Ilha Solteira. Este equipamento permite medir simultaneamente a curva termogravimétrica e a curva de análise termo-diferencial (DTA).

Para a realização deste ensaio foram utilizados crisoles de alumina de 90 μl sem tampa. As análises das pastas de cal/pozolana foram realizadas com uma velocidade de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ e o intervalo de temperatura do ensaio foi entre 35°C e 300°C .

Figura 6 - Equipamento de análise termogravimétrica



Fonte: Do próprio autor.

Para a preparação das amostras foram seguidas as orientações de Tashima (2006). Para isso, antes do ensaio as amostras foram moídas em presença de acetona com o objetivo de parar os processos de hidratação da pasta. Posteriormente a amostra foi filtrada com o auxílio de uma bomba de vácuo e em seguida levada a estufa por 30 minutos a 60°C. Por fim a amostra era armazenada em um pendorfe e levada a análise termogravimétrica.

4.2.2.3 *Perda ao fogo*

O ensaio de perda ao fogo foi realizado com base nos procedimentos do método n° 1, prescritos na NBR NM 18 (ABNT, 2012). Foi utilizada uma amostra de 1,000 g ± 0,001 g que foi colocada em um cadinho de porcelana de massa conhecida, e posteriormente calcinada em forno mufla à temperatura entre (950 ± 50) °C, por um período mínimo de 50 minutos. Em seguida, foi esfriada em dessecador e pesada. E por fim calculou-se a perda ao fogo, em porcentagem, através da seguinte equação:

$$PC/PF = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

m_1 , é a massa do cadinho mais a massa de amostra ensaiada, em gramas;

m_2 , é a massa do cadinho mais a amostra, após calcinação, em gramas;

m , é a massa de amostra utilizada no ensaio, em gramas.

4.2.2.4 *Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise (EDS)*

Esta técnica é essencial no conhecimento das características físicas do material. No entanto, não é de grande importância na classificação quanto ao nível de reatividade ou eficácia quando utilizado em concretos ou produtos à base de cimento Portland. Ainda assim, com base nas imagens geradas pelo MEV é possível estimar o tamanho médio das partículas ou até mesmo a distribuição granulométrica do material (ROCHA, 2005).

Este ensaio consiste basicamente em obter imagens a partir da varredura da superfície de uma amostra sólida por um padrão de rastreamento com um feixe de elétrons finamente focalizado (PINHEIRO, 2008).

Neste trabalho a microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para visualizar os produtos de hidratação das argamassas. O microscópio eletrônico utilizado foi modelo EVO LS15 fabricado pela empresa ZEISS (Figura 7), do Laboratório de física e química da UNESP de Ilha Solteira.

Para melhorar a condutividade elétrica dos materiais, as amostras receberam uma capa metálica, sendo utilizado como material o ouro. Este recobrimento foi realizado utilizando-se o equipamento fabricado pela empresa Quorum e modelo Q150T E. O tempo de exposição da amostra ao ouro foi de 90 segundos, sendo mantida a aproximadamente 55 mm de distância.

Figura 7 - Equipamento microscopia eletrônica de varredura



Fonte: Do próprio autor.

4.2.3 Composição das pastas de cal/pozolana

Para a análise termogravimétrica foram produzidas pastas de cal e pozolana com o traço de 1:1 com relação água/aglomerante de 0,5. As pastas foram moldadas e armazenadas em câmara úmida até as idades de 3, 7 e 28 dias para serem ensaiadas.

4.2.4 Resistência à compressão em argamassas

O ensaio de resistência à compressão das argamassas foi realizado de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997). As argamassas de cimento/pozolana foram substituídas por RCV em 10%, 20% e 30% em relação ao peso do cimento Portland, e foram comparadas com um traço referência de argamassa cimento.

As argamassas foram rompidas nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias que permaneceram em câmara úmida até a ruptura. Foram moldados 03 corpos-de-prova para cada mistura e idade de ensaio, num total de 84 corpos-de-prova.

4.2.4.1 Composição dos traços de argamassa

Para a avaliação da resistência à compressão dos corpos-de-prova das argamassas foi realizado um traço de referência de 1:2 com relação água/aglomerante de 0,45. Além do traço de referência foram realizados outros traços com substituição do cimento Portland CP V – ARI por 10%, 20% e 30% em massa de Resíduo de Cerâmica Vermelha com um tempo de moagem de 20 minutos e 40 minutos.

Para manter constante a relação água/aglomerante e obter uma consistência de 260 ± 5 mm foi utilizado um aditivo hiperplastificante. O percentual de aditivo adicionado nas amostras está relacionado à massa de cimento.

A Tabela 9 apresenta a dosagem dos materiais utilizados para produção das argamassas com 10%, 20% e 30% de RCV e a argamassa de referência produzida sem RCV.

Tabela 9 - Dosagem das argamassas

	Cimento (g)	Areia (g)	Pozolana (g)	Água (g)	Trabalhabilidade (mm)	Aditivo (%)
Referência	2.334	4.666	--	1050	260	--
10%(RCV 20 min.)	2.101	4.666	233,0	1050	255	0,28
20%(RCV 20 min.)	1.867	4.666	467,0	1050	255	0,31
30%(RCV 20 min.)	1.634	4.666	700,0	1050	255	0,34
10%(RCV 40 min.)	2.101	4.666	233,0	1050	265	0,15
20%(RCV 40 min.)	1.867	4.666	467,0	1050	255	0,17
30%(RCV 40 min.)	1.634	4.666	700,0	1050	255	0,25

Pode-se observar através da Tabela 9 que quanto maior a substituição do cimento Portland pelo RCV maior foi o consumo de aditivo hiperplastificante para conseguir manter a mesma trabalhabilidade.

5 RESULTADOS

5.1 ESCOLHA DO TEMPO DE MOAGEM DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

Para a escolha do tempo de moagem do Resíduo de Cerâmica Vermelha foram realizados os seguintes ensaios:

- a) Finura por peneiramento;
- b) Massa específica;
- c) Análise granulométrica.

O objetivo desta parte da pesquisa é avaliar um dos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) que estabelece que para um material ser considerado pozolânico o material retido na peneira de #325 deve ser menor que 20%.

Portanto, a partir desses ensaios foi possível escolher dois tempos de moagem, para fins de comparação, um que atendeu o exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014) apresentando menos de 20% retido na peneira #325, e um outro tempo de moagem que apresentou valores superiores ao exigido pela norma, mais de 20% de material retido na peneira de #325.

5.1.1 Finura por peneiramento

O tempo total de moagem foi de 60 minutos, com amostragens em 10, 20, 30, 40, e 50 minutos. A Tabela 10 apresenta os valores obtidos pelo peneiramento.

Tabela 10 - Percentual retido acumulado

Tempo de Moagem	% retido na peneira #325
10 min.	53
20 min.	28
30 min.	20
40 min.	13
50 min.	8
60 min.	7

Os resultados mostram que, para ambas as amostras, após 40 minutos de moagem o material retido na peneira #325 (45 μm) é menor que 20%, conforme exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para classificação de materiais pozolânicos (Tabela 2).

5.1.2 Massa específica dos sólidos

A massa específica do RCV foi obtida no Laboratório de Engenharia Civil da UNESP. Foram seguidas as orientações descritas na NBR NM 23 (ABNT, 2001). Para tal, foi utilizado como líquido o querosene, para que não ocorresse reação química com o material. Na Tabela 11 abaixo, encontram-se a média dos resultados dos ensaios de massa específica do RCV pelo tempo de moagem.

Tabela 11 - Massa específica de acordo com o tempo de moagem

Tempo de Moagem	Massa específica
10 min.	2,67 g/cm ³
20 min.	2,67 g/cm ³
30 min.	2,67 g/cm ³
40 min.	2,63 g/cm ³
50 min.	2,68 g/cm ³
60 min.	2,67 g/cm ³

Pode-se observar que os resultados diferem pouco entre si. Ou seja, a característica do material não varia com o tempo de moagem. Portanto, notou-se que não há a necessidade de se determinar a massa específica de cada tempo de moagem, uma amostra apenas seria suficiente.

Só para fins de comparação a sílica ativa possui uma massa específica de 2,2 g/cm³ de acordo com Mantuano Netto (2006). Sendo que tanto a sílica ativa quanto o resíduo de cerâmica vermelha, possuem uma massa específica menor que do cimento Portland, que é de aproximadamente 3,10 g/cm³.

5.1.3 Análise granulométrica

Para a análise granulométrica foram retiradas amostras do RCV aos 10 min.; 20 min.; 30 min.; 40 min.; 50 min. e 60 min. de moagem. Com isso, foi possível

determinar a porcentagem retida acumulada e o módulo de finura de cada amostra, como pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 - Porcentagem retida acumulada e módulo de finura

	% média retida acumulada			Módulo de Finura
	300 μm	150 μm	75 μm	
RCV 10 min.	3,06	51,45	79,27	1,34
RCV 20 min.	0,45	33,40	62,40	0,96
RCV 30 min.	0,21	55,34	75,78	1,31
RCV 40 min.	0,61	74,82	90,13	1,66
RCV 50 min.	0,44	66,04	76,85	1,43
RCV 60 min.	1,16	64,58	77,87	1,44

Como podemos observar no Gráfico 1 o RCV com 10 minutos de moagem possui 90% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,28 mm e 50% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,16 mm.

O RCV com 20 minutos de moagem possui 90% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,24 mm e 50% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,10 mm.

O RCV com 30 minutos de moagem possui 90% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,27 mm e 50% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,17 mm.

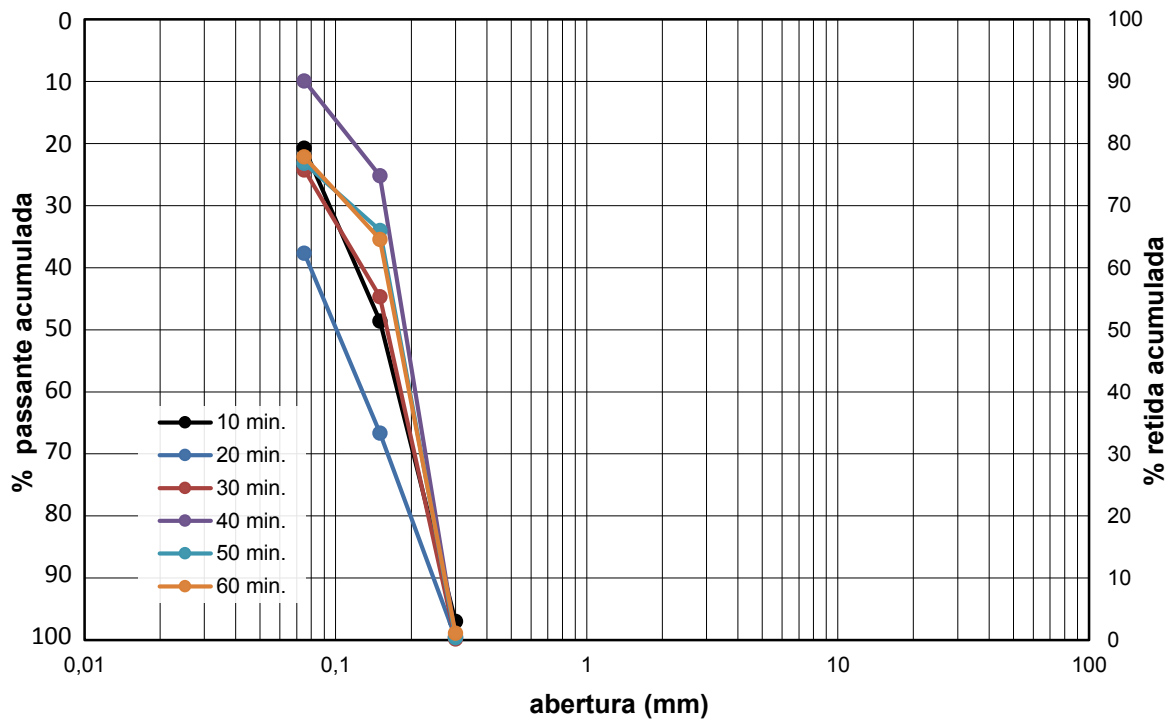
O RCV com 40 minutos de moagem possui 90% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,28 mm e 50% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,19 mm.

E tanto o RCV com 50 minutos quanto o RCV com 60 minutos de moagem possuem 90% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,28 mm e 50% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,18 mm.

Pode-se concluir que o RCV que possui a menor granulometria é o RCV aos 20 minutos de moagem, pois possui 90% de suas partículas com diâmetro inferior a 0,24 mm com módulo de finura de 0,96.

Também podemos observar que há pouca diferença entre os tempos de 10 e 30 minutos, e que ainda a partir dos 30 minutos houve aumento da granulometria e conseqüentemente do módulo de finura. Assim, confirmando que aos 20 minutos o moinho de bolas tem a sua máxima eficiência.

Gráfico 1 - Curva granulométrica



5.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

Para a caracterização do resíduo de cerâmica vermelha, após determinar os tempos adequados de moagem através da finura por meio da peneira de #325, da massa específica e da análise granulométrica, foram realizados os seguintes ensaios:

- a) Microanálise (EDS);
- b) Difração de Raio – X (DRX);
- c) Análise termogravimétrica (TGA e DTA);
- d) Perda ao fogo; e
- e) Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Em relação a escolha dos tempos adequados de moagem, foram escolhidos o RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos de moagem.

O RCV aos 20 minutos de moagem apresentou valor superior ao exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), mais de 20% de material retido na peneira #325. Porém, apresentou o menor módulo de finura demonstrando que aos 20 minutos o moinho de bolas tem a sua máxima eficiência.

O RCV aos 40 minutos de moagem apresentou valor inferior ao exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), menos de 20% de material retido na peneira #325, sendo um dos requisitos para um material ser considerado pozolânico. Contudo, em relação a análise granulométrica apresentou o maior módulo de finura indicando o aglutinamento das partículas.

5.2.1 Microanálise (EDS)

A seguir serão apresentados os resultados da microanálise obtidas através do EDS que é um equipamento acoplado ao MEV. Para tal, foram analisadas quatro imagens de cada RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos de moagem.

Nas figuras 8 e 9 observa-se as imagens geradas pelo EDS do RCV aos 20 minutos de moagem, e a partir dessas imagens foi possível fazer a análise química ou microanálise do material que se apresenta na Tabela 13.

Figura 8 - EDS do RCV aos 20 minutos de moagem, **a** imagem 01; **b** imagem 02

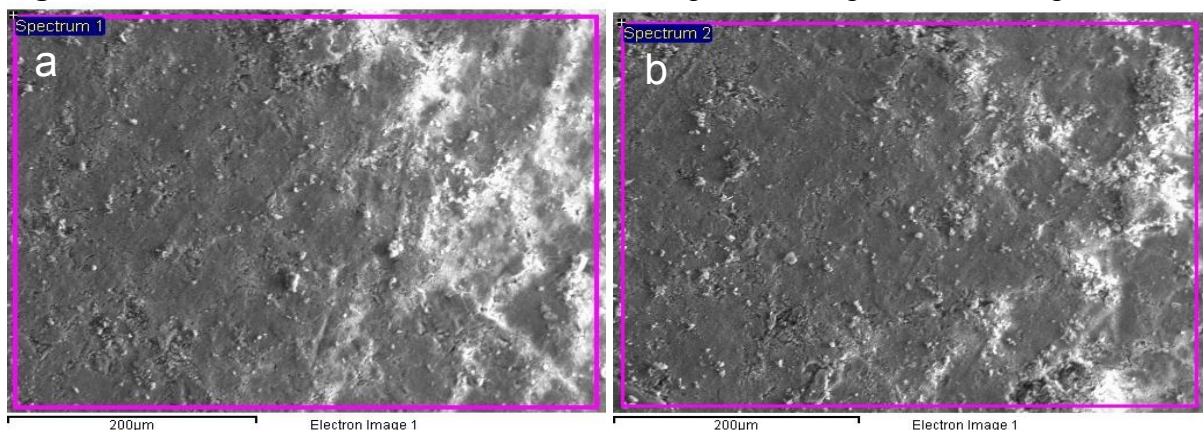
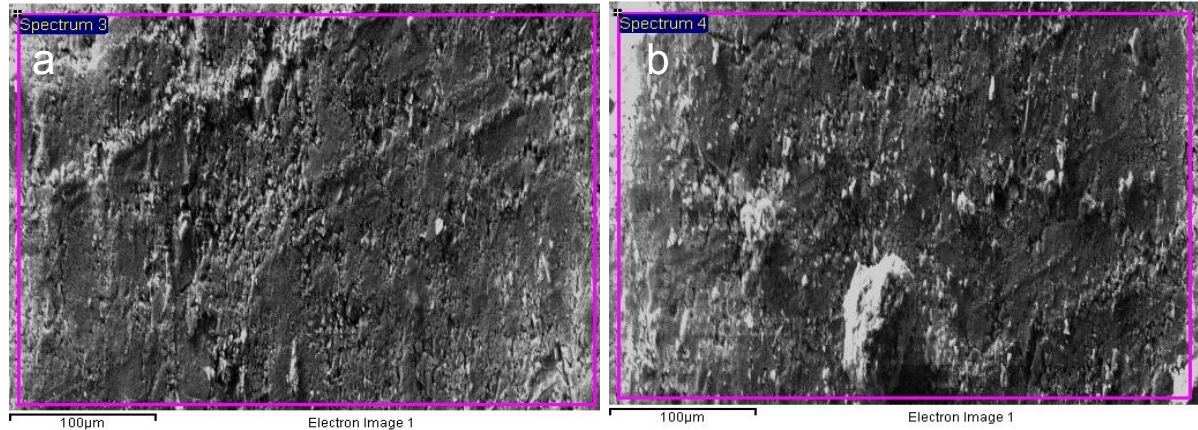


Figura 9 - EDS do RCV aos 20 minutos de moagem, **a** imagem 03; **b** imagem 04

A Tabela 13 apresenta os resultados da microanálise do RCV aos 20 minutos. Com isso, podemos observar que não foi encontrada a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3), mas foi encontrada a presença de Ferro (Fe) e em menor quantidade foi possível verificar a presença de feldspato e de metassilicato de cálcio.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) para um material ser considerado pozolânico deve conter 70% ou mais de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Portanto mesmo o RCV não possuindo óxido de ferro em sua composição química consegue atingir valores superiores a 70% estando de acordo com a norma.

Tabela 13 - Microanálise do RCV aos 20 minutos de moagem

Elementos	Figura 08 (%) Em massa		Figura 09 (%) Em massa	
	Imagem 01	Imagem 02	Imagem 03	Imagem 04
SiO_2	89,37	89,37	87,59	86,68
Al_2O_3	7,65	7,49	5,69	5,75
Fe	1,46	1,54	0,43	0,49
MgO	0,40	0,40	0,43	0,38
Outros	1,12	1,20	12,41	6,70

Do mesmo modo, nas figuras 10 e 11 observa-se as imagens geradas pelo EDS do RCV aos 40 minutos de moagem, e a partir dessas imagens foi possível fazer a análise química ou microanálise do material que está na Tabela 14.

Figura 10 - EDS do RCV aos 40 minutos de moagem, **a** imagem 01; **b** imagem 02

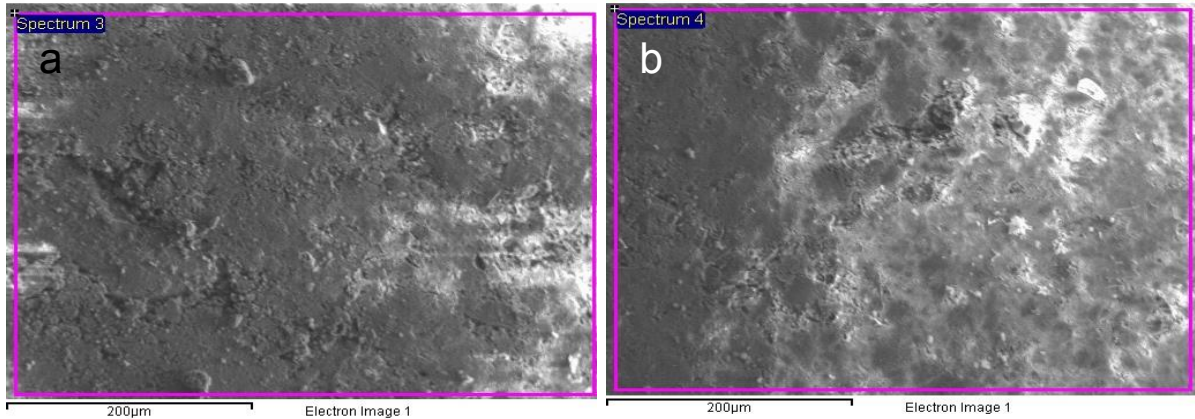
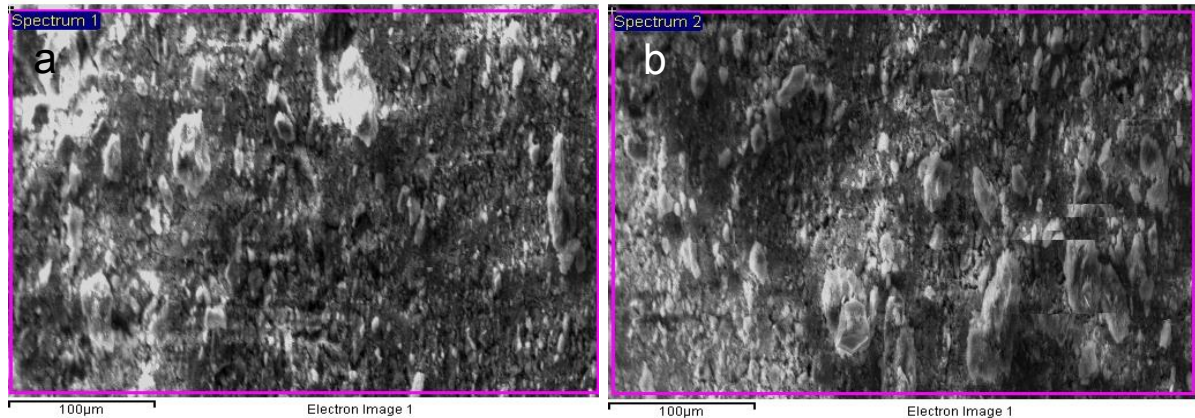


Figura 11 - EDS do RCV aos 40 minutos de moagem, **a** imagem 03; **b** imagem 04



A Tabela 14 apresenta os resultados da microanálise do RCV aos 40 minutos. E assim como o resultado do RCV aos 20 minutos também não foi encontrada a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3), mas foi encontrada a presença de Ferro (Fe) e em menor quantidade foi possível verificar a presença de feldspato e de metassilicato de cálcio.

E como verifica-se na Tabela 14 o RCV aos 40 minutos de moagem também possui mais que 70% de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ estando de acordo com o exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 14 - Microanálise do RCV aos 40 minutos de moagem

Elementos	Figura 10		Figura 11	
	(%) Em massa		(%) Em massa	
	Imagem 01	Imagem 02	Imagem 03	Imagem 04
SiO ₂	91,05	89,83	87,81	86,64
Al ₂ O ₃	6,60	7,31	5,48	5,98
Fe	1,02	1,30	0,94	1,03
MgO	0,39	0,41	0,41	0,36
Outros	0,94	1,15	5,36	5,99

5.2.2 Difração de Raio – X

De acordo com Tashima (2006) o ensaio de difração de Raio – X estuda a composição mineralógica do material, sendo que se houver a presença de picos no difratograma esses corresponderão a materiais cristalinos ou com algum caráter cristalino. E se apresentar um desvio na linha base entre 15 e 30 graus será o indicativo para um material ser considerado amorfo.

As figuras 12 e 13 apresentam os difratogramas do RCV aos 20 minutos e 40 minutos de moagem respectivamente.

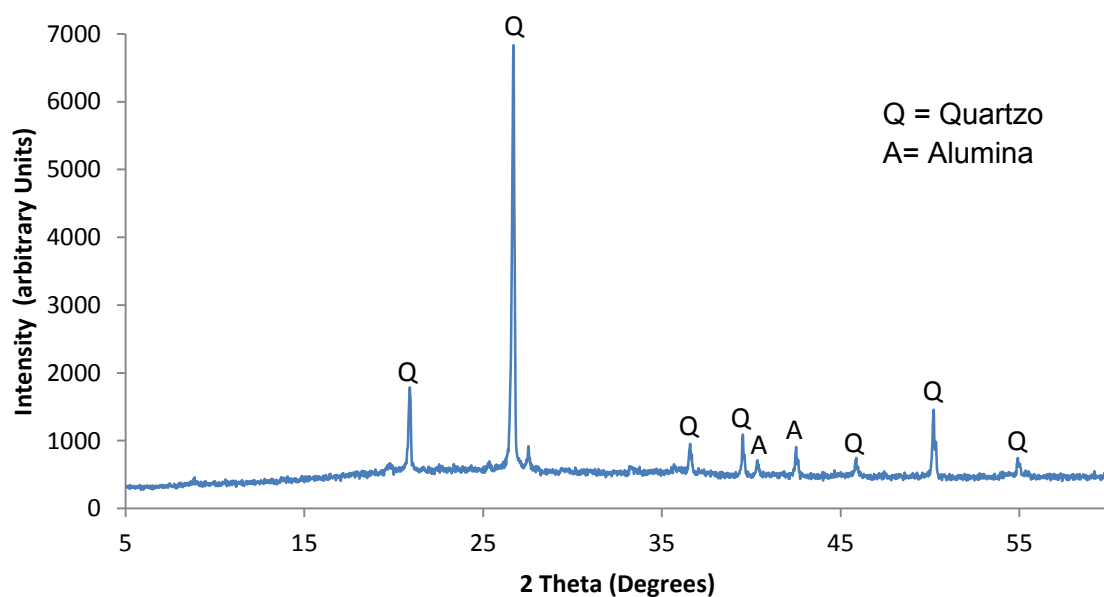
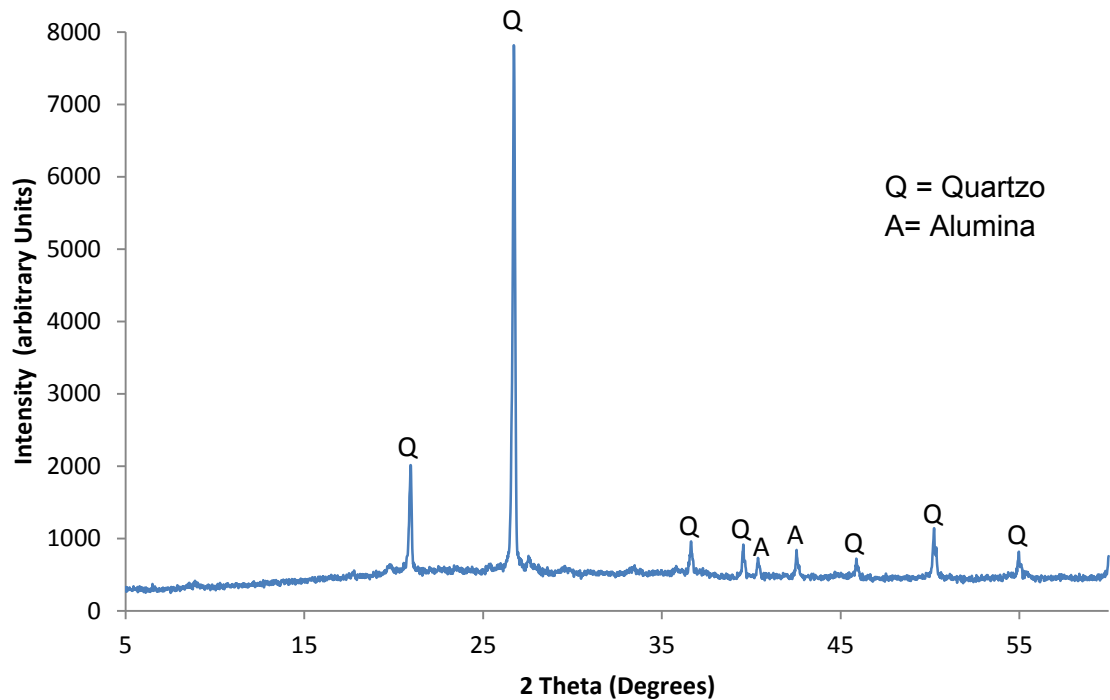
Figura 12 - Difração de Raio X do RCV aos 20 minutos

Figura 13 - Difração de Raio X do RCV aos 40 minutos



Através dos resultados obtidos, notou-se que há pouca diferença entre as amostras e que nenhuma apresentou desvio na linha base entre 15 e 30 graus, como indicativo de amorficidade. Porém, notou-se que as amostras apresentam picos bem definidos indicando a presença de materiais cristalinos em sua composição, como o quartzo e alumina, com isso podemos observar uma coerência entre os resultados do DRX e do EDS.

5.2.3 Análise termogravimétrica

De acordo com Tashima (2012) a termogravimetria é uma técnica instrumental que mede o ganho ou a perda de massa em função da variação de temperatura. Geralmente, as perdas de massa são causadas pela desidratação dos produtos formados pela reação do cimento Portland com a água. A partir desta evidência pode-se extrapolar o processo e quantificar a reação pozolânica, avaliando a fixação do hidróxido de cálcio com a adição mineral de uma pozolana. Para tal, podem ser preparadas tanto pastas de cimento/pozolana quanto pastas de cal/pozolana.

Nas Figuras 14, 15 e 16 estão apresentadas as curvas das análises térmicas diferenciais (DTA) e gravimétricas (TGA) da pasta de cal e RCV aos 20 minutos de moagem nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

E nas Figuras 17, 18 e 19 estão apresentadas as curvas das análises térmicas diferenciais (DTA) e gravimétricas (TGA) da pasta de cal e RCV aos 40 minutos de moagem nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Segundo Tashima (2006) a curva TGA mostra a perda de massa (água) em função da temperatura e a curva DTA fornece informações a respeito da velocidade com que ocorre a perda de massa, em função da temperatura e do tempo. Sendo que os valores de fixação da cal são calculados a partir da curva DTA.

Pode-se observar que em todas as figuras as curvas de DTA apresentam perdas de massa sempre a uma mesma temperatura independente das idades, variando apenas a quantidade de água perdida.

Sendo que o primeiro pico, temperatura de aproximadamente 120°C indica a perda de massa devido aos hidratados, e o segundo pico aproximadamente 430°C indica a perda de massa devido a portlandita. Sendo que a perda de massa entorno de 430°C corresponde a desidroxilação do hidróxido de cálcio.

Figura 14 - Curvas TG e DTA cal/RCV aos 20 minutos de moagem aos 3 dias de cura

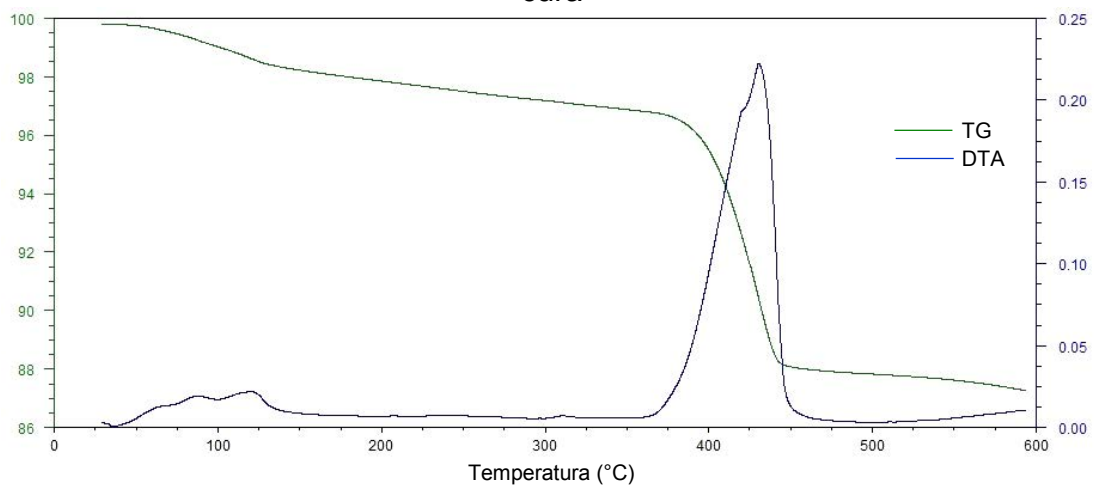


Figura 15 - Curvas TG e DTA cal/RCV aos 20 minutos de moagem aos 7 dias de cura

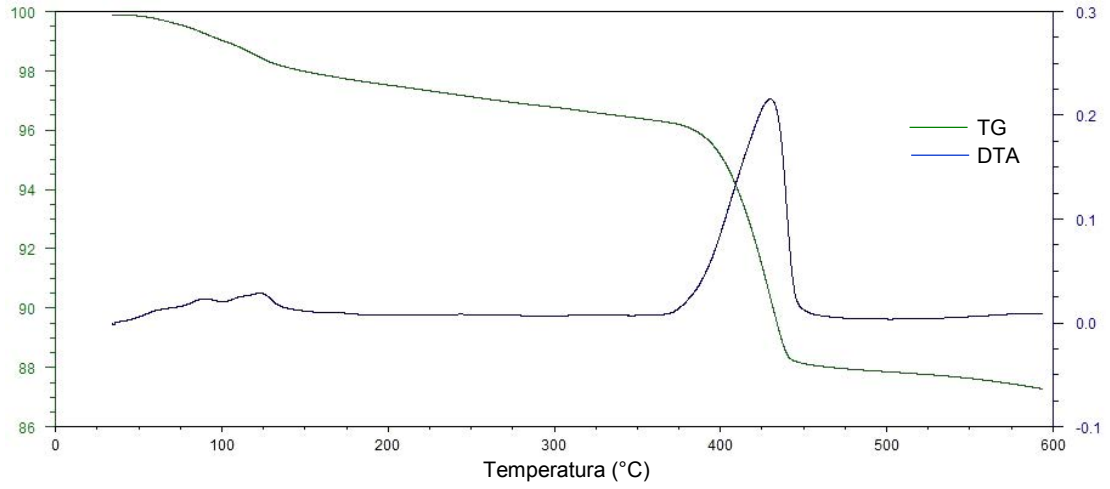


Figura 16 - Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 20 minutos de moagem aos 28 dias de cura

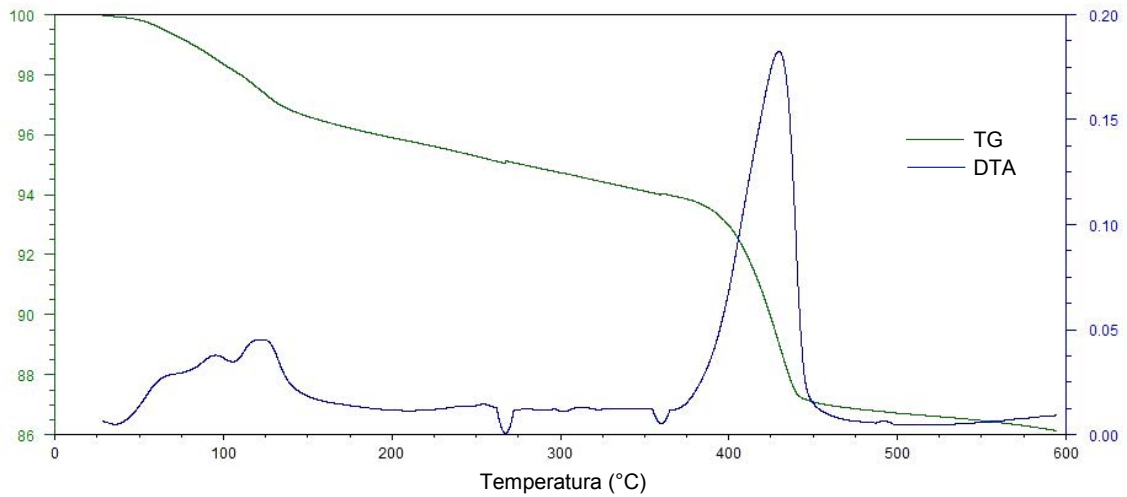


Figura 17 - Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 40 minutos de moagem aos 3 dias de cura

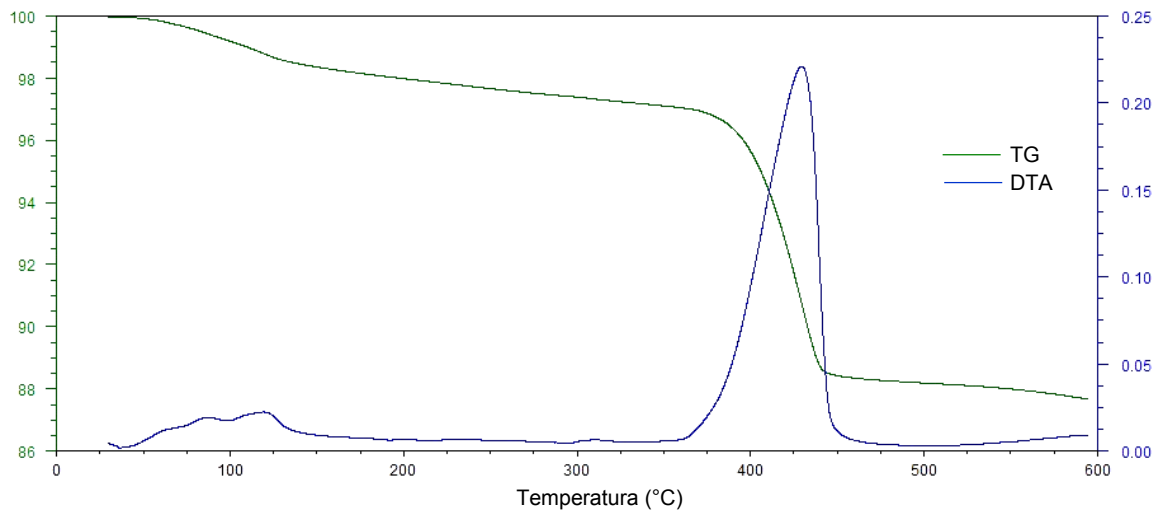


Figura 18 - Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 40 minutos de moagem aos 7 dias de cura

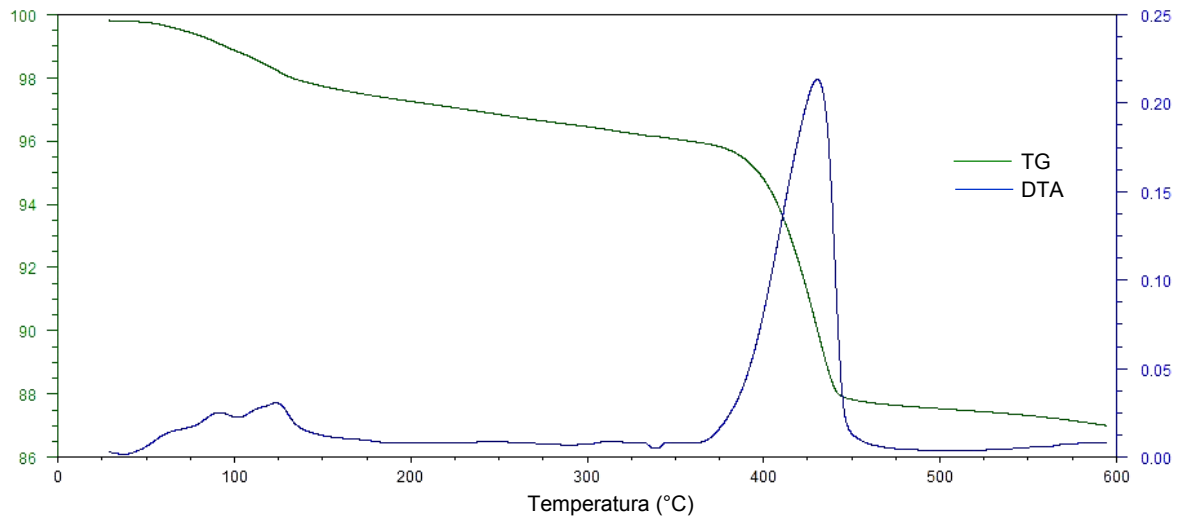
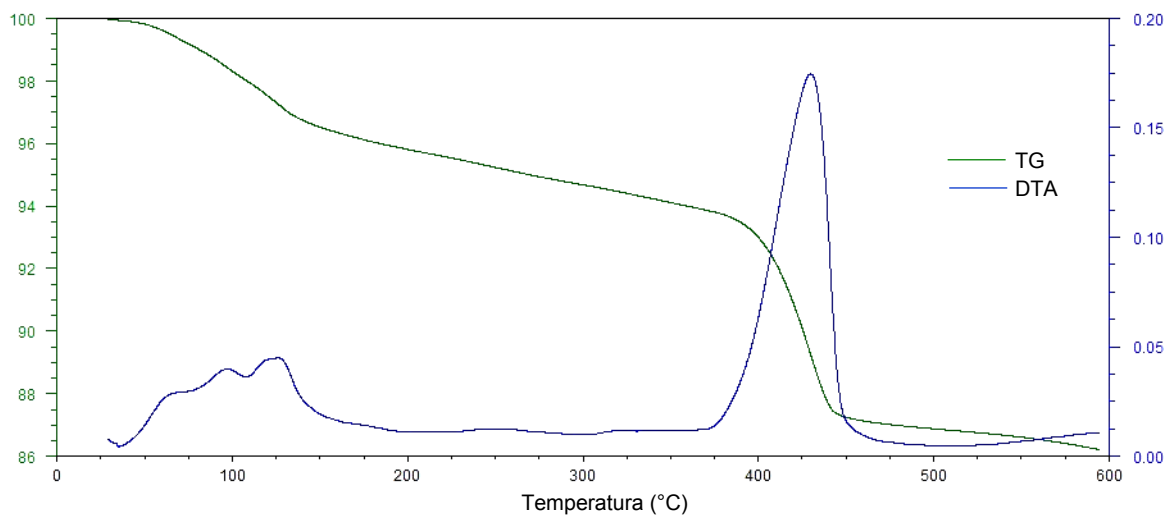


Figura 19 - Curvas de TG e DTA cal/RCV aos 40 minutos de moagem aos 28 dias de cura



A seguir encontra-se o modelo de cálculo proposto por Tashima (2012). O cálculo da fixação da cal é realizado através do processo de desidroxilação do CH, que corresponde a reação:



Para o cálculo da porcentagem de cal fixada pela adição mineral se utiliza a seguinte equação:

$$\text{Cal fixada (\%)} = \frac{CH_0 - CH_p}{CH_0} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

CH_0 , é a quantidade inicial da cal presente na pasta;

CH_p , é a quantidade de portlandita presente na pasta de cal/pozolana para um determinado tempo de cura.

A quantidade de CH presente na pasta se calcula a partir da estequiometria da equação (3), utilizando a equação (5):

$$CH_p = \frac{H}{PM_H} \times PM_{CH} \quad (5)$$

Onde:

H, é a perda de massa devido a desidratação da cal presente na pasta;

PM_H , é o peso molecular do H_2O ;

PM_{CH} , é o peso molecular do hidróxido de cálcio (CH).

Neste estudo optou-se pela produção de pastas de cal/pozolana com o traço de 1:1 com relação água/aglomerante de 0,5, com 3, 7 e 28 dias de cura. Na Tabela 15 podem-se observar os valores de perda total e a perda de massa devido a desidratação da cal presente nas pastas de cal/RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos de moagem.

Tabela 15 - Perda total e a perda de massa devido a desidratação da cal presente nas pastas (H) de cal/RCV com traço de 1:1

	Idade (dias)	Perda Total (%)	H (%)
RCV aos 20 min. de moagem	03	12,53	10,34
RCV aos 20 min. de moagem	07	12,60	10,05
RCV aos 20 min. de moagem	28	13,83	9,89
RCV aos 40 min. de moagem	03	12,31	10,31
RCV aos 40 min. de moagem	07	12,80	10,14
RCV aos 40 min. de moagem	28	13,75	9,57

As porcentagens de cal fixada (%) são calculadas a partir das equações 4 e 5 onde encontram-se resumidas na Tabela 16.

Tabela 16 - Fixação da cal em função do RCV e da idade de cura

	Tempo de cura (dias)		
	3	7	28
	% de Cal Fixada		
RCV aos 20 minutos (1:1)	10,51	13,02	14,40
RCV aos 40 minutos (1:1)	10,77	12,24	17,17

Pode-se observar que as porcentagens de cal fixada aumentam com o tempo de cura. Aos 28 dias o RCV aos 20 minutos e o RCV aos 40 minutos, apresentam respectivamente, 14,40% e 17,17% de cal fixada. Os resultados indicam que ambas as amostras, RCV aos 20 minutos e RCV aos 40 minutos, apresentam reação pozolânica, pois são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio, porém sua reação acontece de forma lenta, o que é considerado uma característica dos materiais pozolânicos.

5.2.4 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi realizado para verificar o teor de carbono das pozolanas. Os resultados deste ensaio encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Perda ao fogo

	Perda ao fogo (%)
RCV 20 min.	6%
RCV 40 min.	5%

De acordo com o estabelecido na NBR 12653 (ABNT, 2014) para um material ser considerado pozolânico deve apresentar valor igual ou menor que 10%. Logo é possível verificar com os resultados obtidos tanto do RCV aos 20 minutos quanto do RCV aos 40 minutos apresentam valores inferiores aos especificados, estando assim de acordo com as exigências da norma citada.

5.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 20 e a Figura 21 mostram respectivamente o RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos de moagem. Pode-se observar que ambas as amostras apresentam uma grande quantidade de partículas finas, com diâmetros de aproximadamente 1 μm . Além disso, pode-se observar que as partículas possuem forma e textura irregular.

Figura 20 - MEV do RCV aos 20 minutos

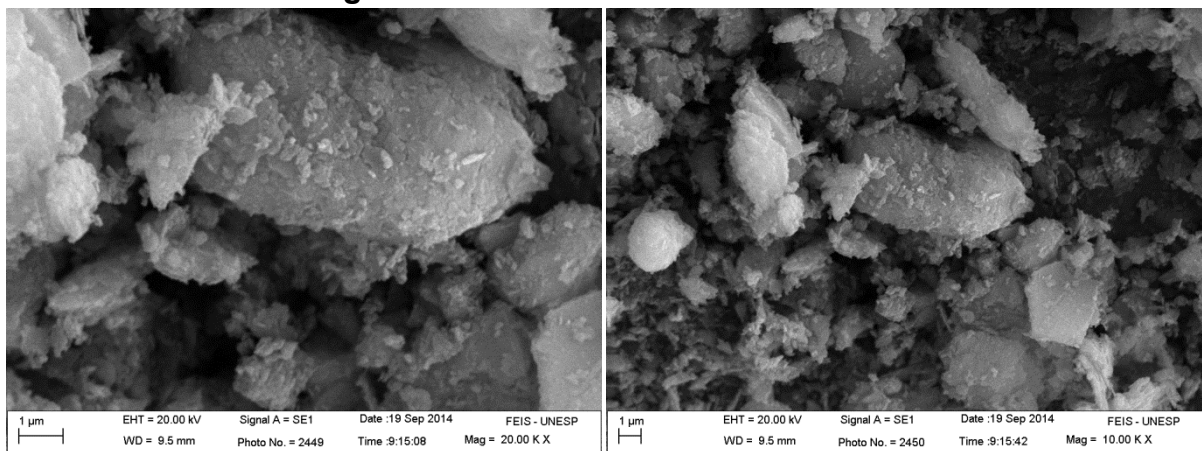
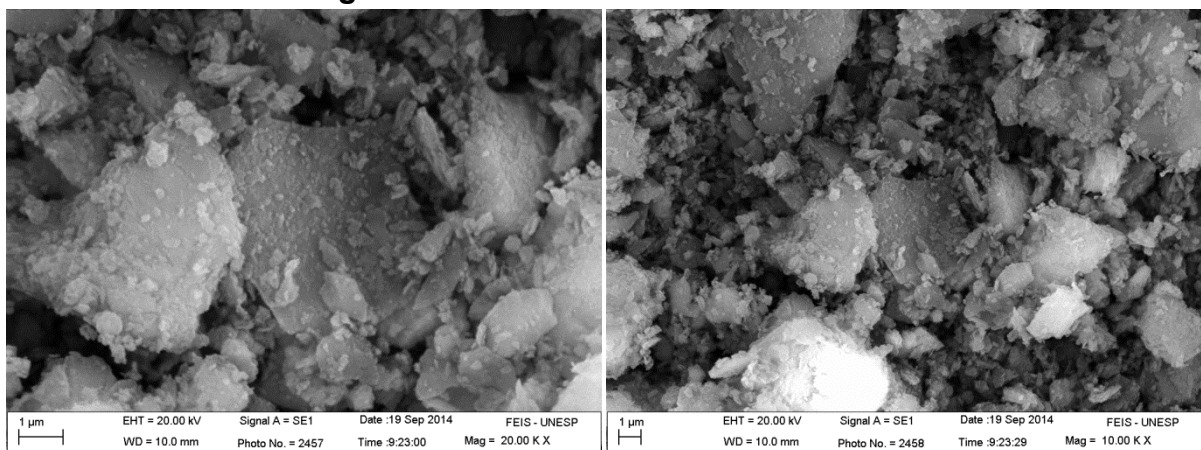


Figura 21 - MEV do RCV aos 40 minutos



Também, foram realizadas imagens das argamassas com 10%, 20% e 30% de RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos de moagem.

Para tal, foram utilizados pedaços de argamassa retirados dos corpos de prova rompidos no ensaio de compressão nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. A metalização das amostras foi feita por uma camada fina de ouro.

As figuras 22, 23 e 24 ilustram as imagens das argamassas com 10%, 20%, 30% de RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos com idade de 7 dias. Com isso, observa-se uma matriz fibrosa de C-S-H (silicatos de cálcio hidratado), a presença de CH (hidróxido de cálcio) e em menor quantidade a etringita.

Figura 22 - MEV argamassa com 10% de RCV aos 7 dias, **a** RCV aos 20 minutos; **b** RCV aos 40 minutos

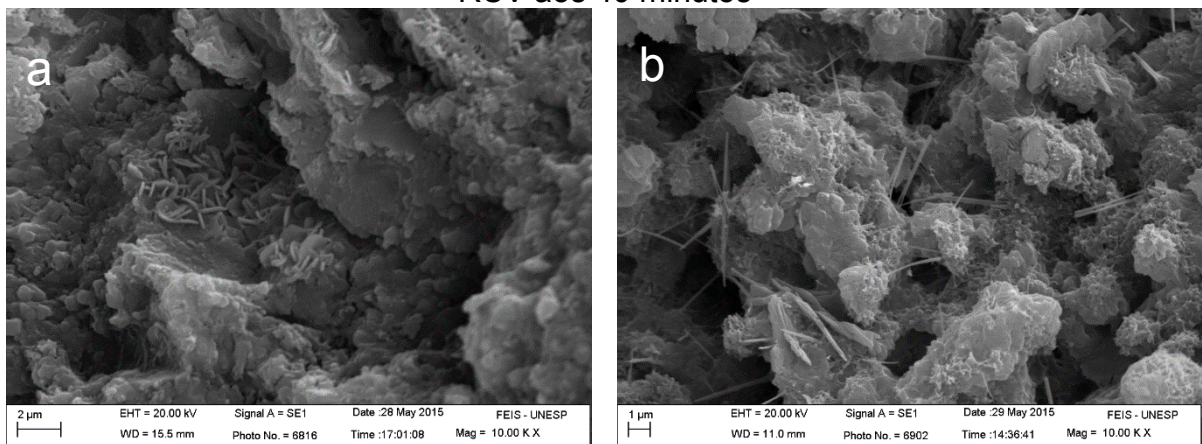


Figura 23 - MEV argamassa com 20% de RCV aos 7 dias, **a** RCV aos 20 minutos; **b** RCV aos 40 minutos

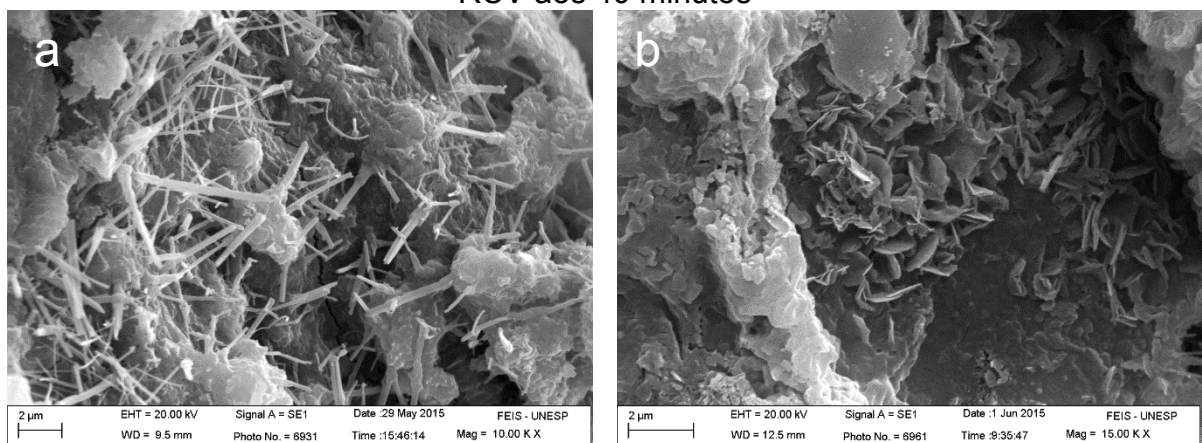
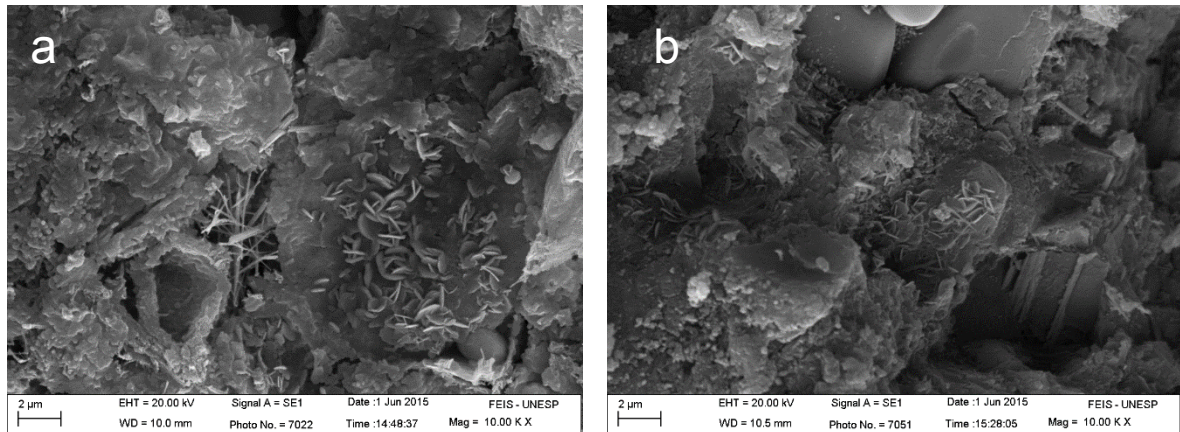


Figura 24 - MEV argamassa com 30% de RCV aos 7 dias, **a** RCV aos 20 minutos; **b** RCV aos 40 minutos



A seguir, as figuras 25, 26 e 27 ilustram as imagens das argamassas com 10%, 20%, 30% de RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos com idade de 14 dias. E ainda, nota-se a presença de etringita que são pequenos filamentos finos, cristais de CH e C-S-H.

Figura 25 - MEV argamassa com 10% de RCV aos 14 dias, **a** RCV aos 20 minutos; **b** RCV aos 40 minutos

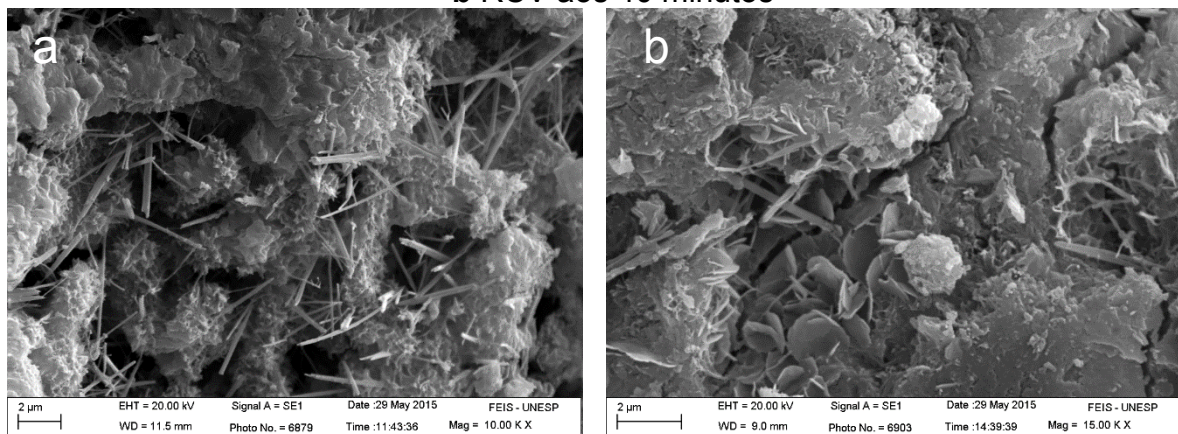


Figura 26 - MEV argamassa com 20% de RCV aos 14 dias, **a** RCV aos 20 minutos;
b RCV aos 40 minutos

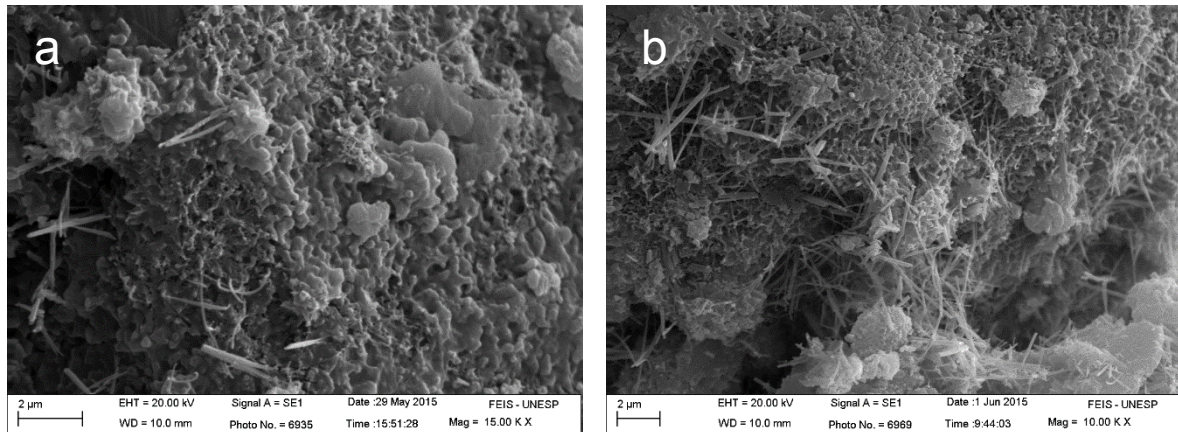
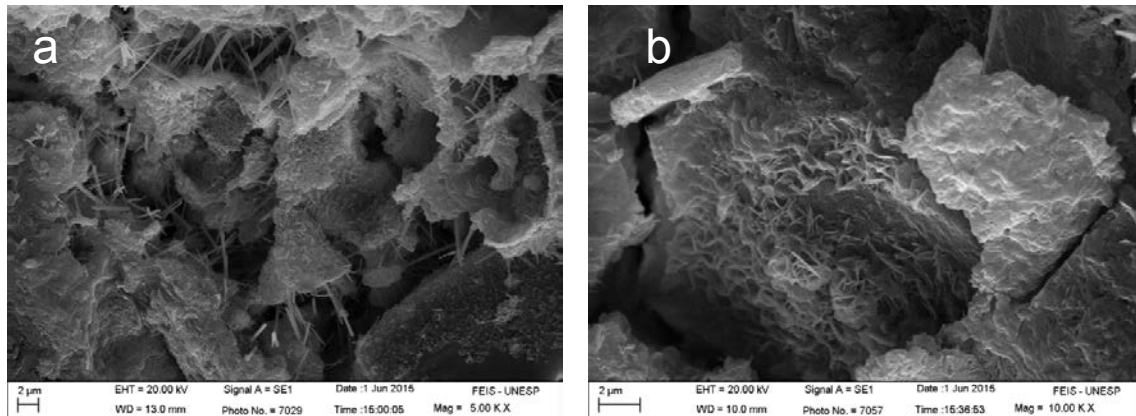


Figura 27 - MEV argamassa com 30% de RCV aos 14 dias, **a** RCV aos 20 minutos;
b RCV aos 40 minutos



As figuras 28, 29 e 30 ilustram as imagens das argamassas com 10%, 20%, 30% de RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos com idade de 28 dias. Nota-se também em maior quantidade a presença de etringita e de silicatos de cálcio hidratados.

Figura 28 - MEV argamassa com 10% de RCV aos 28 dias, **a** RCV aos 20 minutos;
b RCV aos 40 minutos

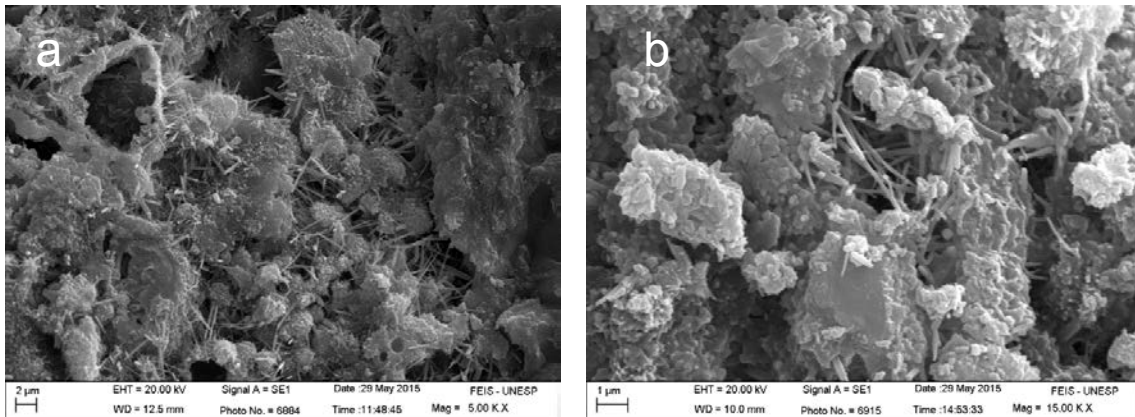


Figura 29 - MEV argamassa com 20% de RCV aos 28 dias, **a** RCV aos 20 minutos;
b RCV aos 40 minutos

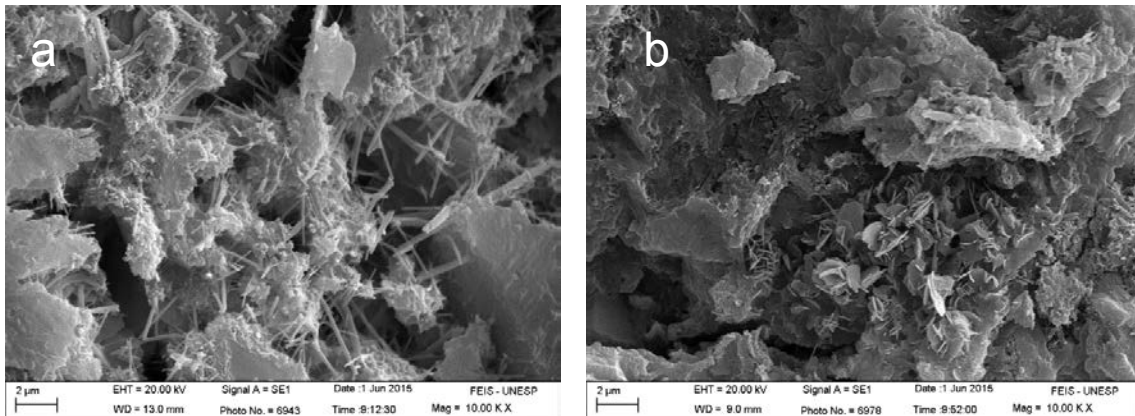
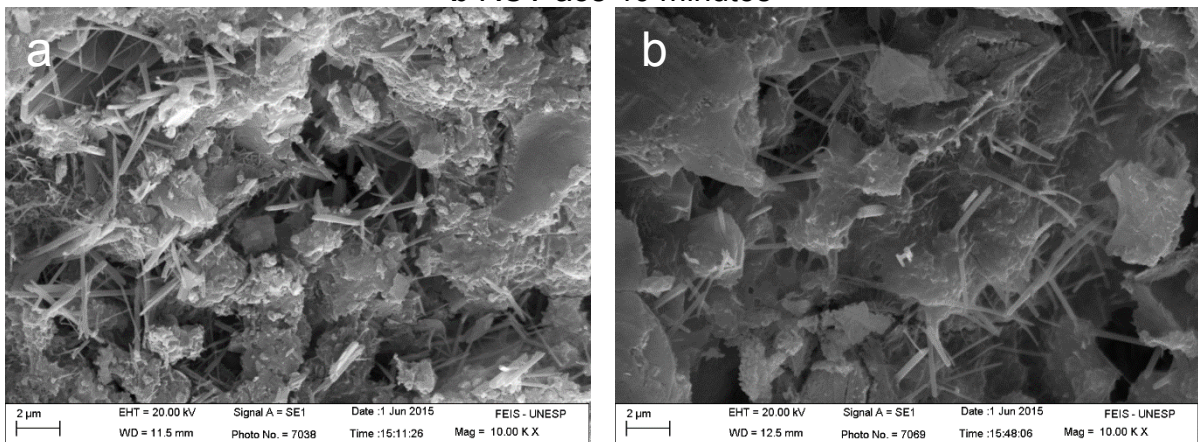


Figura 30 - MEV argamassa com 30% de RCV aos 28 dias, **a** RCV aos 20 minutos;
b RCV aos 40 minutos



5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples em argamassas com 10%, 20% e 30% de RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos de moagem em substituição ao cimento e também foi realizada uma argamassa de referência com 0% de RCV. Para tal, os corpos de prova de argamassa foram rompidos nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Sendo que sua composição encontra-se descrito no item 4.2.4.1.

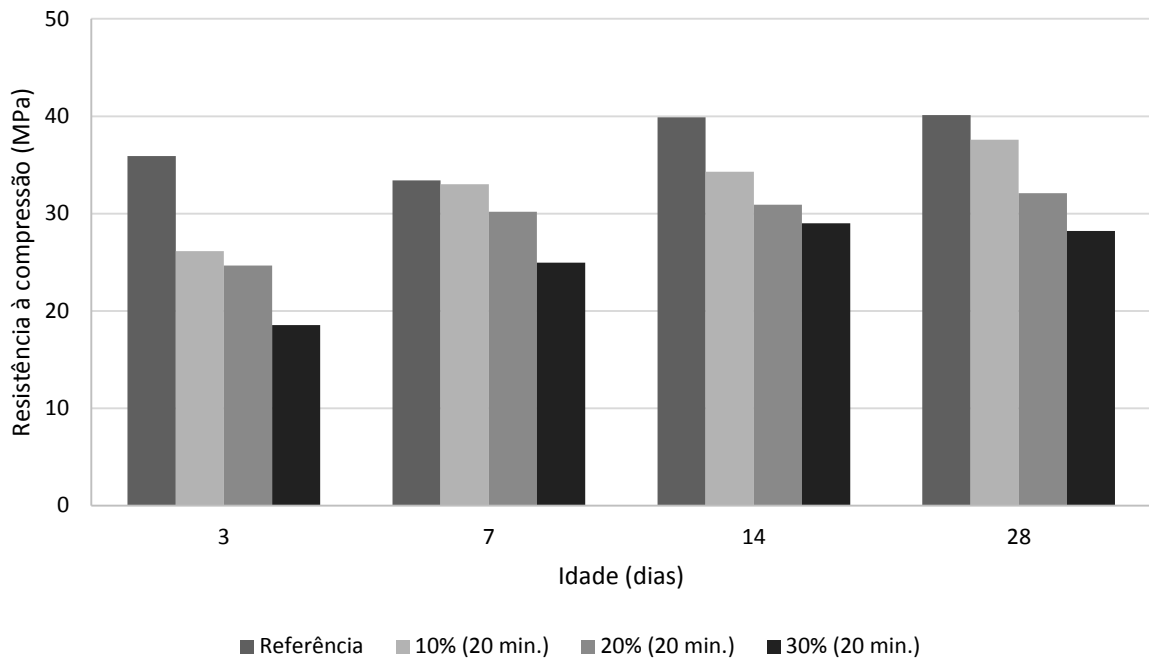
A Tabela 18 apresenta os resultados da resistência à compressão média das argamassas produzidas com 10%, 20% e 30% de RCV aos 20 minutos e aos 40 minutos de moagem.

Tabela 18 - Resistência à compressão média das argamassas

	3 dias (MPa)		7 dias (MPa)		14 dias (MPa)		28 dias (MPa)	
	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo	Média	Intervalo
Referência	35,9	(34,6-37,3)	33,4	(29,8-37,1)	39,9	(38,9-41,0)	40,1	(38,6-41,6)
10% RCV (20 min.)	26,1	(25,1-27,2)	33,0	(31,7-34,4)	34,3	(32,3-36,3)	37,6	(36,8-38,4)
20% RCV (20 min.)	24,7	(24,6-24,7)	30,2	(28,0-32,4)	30,9	(29,6-32,2)	32,1	(30,5-33,7)
30% RCV (20 min.)	18,6	(18,7-18,4)	24,9	(23,9-26,0)	29,0	(28,3-29,8)	28,2	(25,9-30,5)
10% RCV (40 min.)	28,6	(28,3-28,9)	34,5	(33,4-35,6)	37,3	(36,3-38,4)	41,2	(41,0-41,4)
20% RCV (40 min.)	25,8	(24,2-27,4)	34,3	(33,3-35,3)	33,7	(30,7-36,7)	37,1	(36,9-37,4)
30% RCV (40 min.)	21,7	(21,1-22,2)	31,1	(29,7-32,5)	33,0	(32,6-33,4)	35,8	(35,3-36,2)

O Gráfico 2 apresenta a resistência à compressão média das argamassas com 10%, 20% e 30% de RCV aos 20 minutos de moagem.

Gráfico 2 - Resistência à compressão média das argamassas com RCV aos 20 minutos



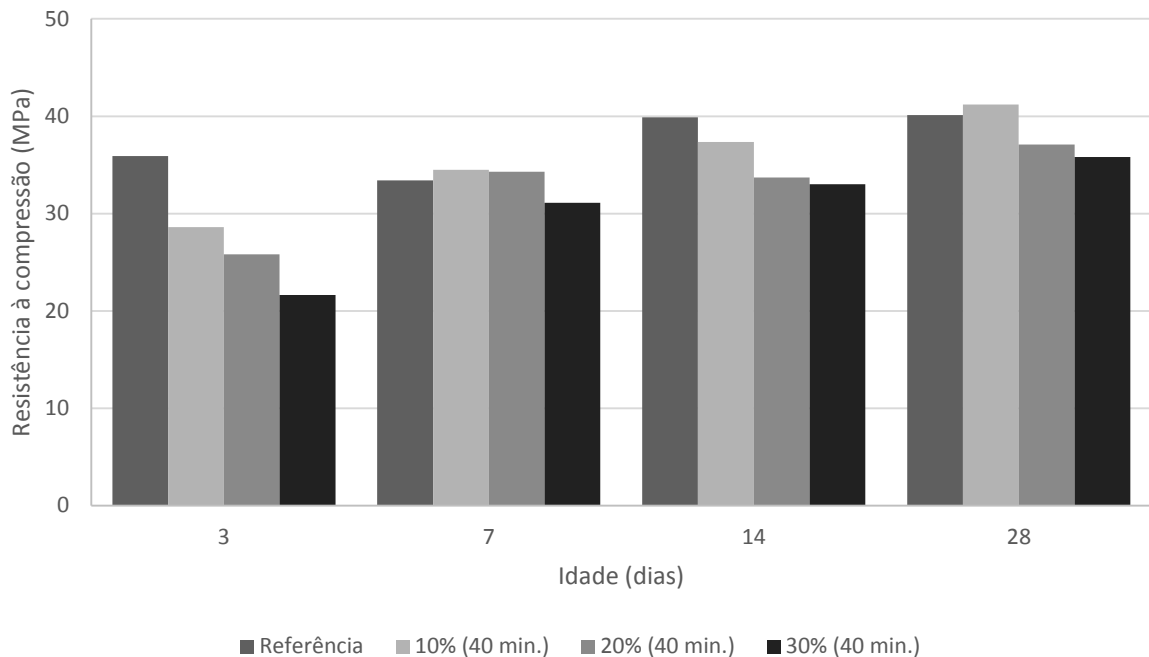
Em relação a argamassa de referência todas as argamassas com substituição de RCV aos 20 minutos de moagem apresentaram valores abaixo. Além disso, quanto maior a substituição do cimento Portland pelo RCV menor o resultado da resistência à compressão das argamassas.

Com isso, a argamassa com 30% de RCV aos 20 minutos de moagem apresentou uma redução de resistência à compressão aos 28 dias de aproximadamente 30% em relação ao traço de referência.

Portanto, admite-se a substituição de no máximo 20% de RCV aos 20 minutos de moagem, aos 28 dias, pois reduz apenas 20% da resistência à compressão sem apresentar um efeito prejudicial sobre a resistência, além de proporcionar economia, uma vez que deixa-se de utilizar o cimento Portland e passa-se a utilizar o RCV.

A seguir, encontra-se o Gráfico 3 que apresenta a resistência à compressão média das argamassas com 10%, 20% e 30% de RCV aos 40 minutos de moagem.

Gráfico 3 - Resistência à compressão média das argamassas com RCV aos 40 minutos



As argamassas com RCV aos 40 minutos de moagem apresentaram melhores valores de resistência à compressão em comparação a argamassa com RCV aos 20 minutos.

Sendo que nas primeiras idades podemos observar que há uma diminuição significativa dos valores de resistência à compressão das argamassas, porém aos 28 dias de idade as argamassas apresentaram valores de resistência à compressão muito próximos ao de referência, além de que aos 28 dias a argamassa com 10% de RCV aos 40 minutos de moagem apresentou resistência superior à argamassa de referência.

No geral, pode-se perceber que nos primeiros dias de idade ambas as argamassas com RCV apresentam uma diminuição da resistência à compressão em relação ao traço de referência, porém nota-se que aos 28 dias a um ganho significativo de resistência ficando próximo do valor da argamassa de referência, o que indica que a pouca reação pozolânica que existe ocorre de forma lenta, o que é considerado uma característica desse material.

Sendo que o único traço que obteve o resultado de resistência à compressão maior que o traço de referência foi a argamassa com 10% de RCV aos 40 minutos

de moagem. Além disso, a argamassa com RCV aos 40 minutos obteve valores superiores de resistência à compressão quando comparado com a argamassa com RCV aos 20 minutos.

Ainda, pode-se observar que conforme aumentava-se o teor de RCV em substituição ao cimento Portland diminuía-se os valores de resistência à compressão.

6 CONCLUSÃO

Através dos ensaios realizados pode-se concluir que ambas as amostras apresentam atividade pozolânica, pois possuem em sua composição química sílica e alumina, e mesmo apresentando grande parte de seus elementos em estado cristalino, observou-se através da análise termogravimétrica que o RCV consome hidróxido de cálcio.

Em relação a escolha do tempo de moagem do RCV, foram escolhidos dois tempos de moagem, 20 minutos e 40 minutos. O RCV aos 40 minutos de moagem atende ao exigido pela norma, que especifica que o material deve conter menos de 20% de material retido na peneira de #325 (45 μm). Já o RCV aos 20 minutos de moagem não atende as especificações da norma, pois possui mais de 20% de material retido na peneira de #325.

Na análise termogravimétrica é possível verificar que as amostras, aos 20 minutos e 40 minutos de moagem, possuem reação pozolânica, pois são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio além de formarem CSH e CAH. Outra característica observada é que a reação pozolânica acontece de forma lenta, o que é considerado uma característica dos materiais pozolânicos.

Além disso, a caracterização química do RCV apresentou valores de SiO_2 e Al_2O_3 maiores que 90%. Porém, através do ensaio de difração de Raio – X é possível verificar que grande parte do SiO_2 e Al_2O_3 encontram-se em estado cristalino.

Em relação a resistência a compressão das argamassas conclui-se que a substituição do cimento Portland pelo RCV aos 20 minutos de moagem é viável até 20%, sem apresentar um efeito prejudicial sobre a resistência. Além disso, o RCV aos 40 minutos de moagem apresentou o melhor resultado, pois pode ser substituído em até 30% em relação ao cimento Portland.

Por fim, a utilização do Resíduo de Cerâmica Vermelha utilizado como material pozolânico poderá apresentar uma redução dos custos de produção do cimento Portland além de proporcionar uma destinação final correta, pois ao introduzir o RCV em cimentos compostos, a maior parte dos metais nocivos podem

ser incorporados com segurança nos produtos de hidratação do cimento e ainda preservar os recursos naturais.

As conclusões apresentadas referem-se apenas ao material utilizado. Embora o RCV em estudo apresente atividade pozolânica, é necessário a realização de ensaios mais avançados e em longo prazo para complementar os resultados obtidos por essa pesquisa.

Portanto, após os resultados obtidos, propõe-se sugestões para trabalhos futuros: Ensaio com mais de 28 dias de idade. Análise granulométrica através da granulometria a laser. A determinação do teor de sílica amorfa para complementação e confirmação da atividade pozolânica. Estudo da viabilidade financeira. Verificação da durabilidade do RCC, como carbonatação, expansão e retração. E a ativação do RCC através da ativação alcalina.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J.; MORAIS, A.O.; COSTA, E.B.C.; GEYER, A. Análise da influência de diferentes tipos de sílica ativa na produção de concretos de alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. p. 1-6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. **Fluxograma:** processo de fabricação de cerâmica vermelha. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=45>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. **Definição e classificação.** [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4&submenu=46>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 18:** cimento portland – análise química – determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 23:** cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 24:** materiais pozolânicos – determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5751:** materiais pozolânicos – determinação da atividade pozolânica – índice de atividade pozolânica com cal – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5752:** materiais pozolânicos – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5753:** cimento Portland – ensaio de pozolanidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181:** solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1988. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215:** cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12653:** materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15894-3:** metacaolím para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – parte 3: determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER. **Dados oficiais.** [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br/index.asp?pg=institucional.asp&secao=3&categoria=60&selMenu=3>>. Acesso em: 24 mar. 2014.

Ay, N.; Ünal, M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concrete Research**. Turkey, v. 30, n. 3, p. 497-499, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600002027>>. Acesso em: 10 set. 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº. 307, de 05 de julho de 2002. Brasília DF, n. 136, 17 de julho de 2002. Seção 1.

CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S.; CASSA, J.C.S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: Editora EDUFBA, 2001. 312 p.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: G. C. Isaia, 2005. v. 1, p. 345-378.

FAJARDO, B. F. **Aproveitamento de dois resíduos industriais – pó do corte do granito e catalisador do craqueamento do petróleo – na fabricação de elementos construtivos estruturais**. 2005. 312 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Faculdade Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FARIAS FILHO, J. D.; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 437-444, 2000.

LAVAT, A.E.; TREZZA, M.A.; POGGI, M. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. **Waste Management**, Olavarria, v. 29, n. 5, p. 1666-1674, 2009. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08003693>>. Acesso em: 12 de set. 2014.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 3. ed. Nova York: Dover Publishing. 1971. 375 p.

LEA, F. M. **Chemistry of cement and concrete**. 4. ed. Oxford: Elsevier, 1998. 1057 p.

MANTUANO NETTO, R. **Materiais pozolânicos**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2006. 148 p.

MATOS NETO, J. A. **Caracterização de estéril argiloso para utilização como pozolana**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

MEHTA, P. K.; MALHOTRA, V. M. **Pozzolanic and cementitious materials**. Amsterdam: OPA, 1996. 189 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MENDES, S.E.S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2002.

MENDES, B.S.; BORJA, E.V. **Estudo experimental das propriedades físicas de argamassas com adição de resíduos de cerâmicas vermelhas recicladas**. Rio Grande do Norte: CEFET, 2007. 9 p. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/127/115>>. Acesso em: 15 out. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Anuário estatístico do setor transformação de não metálicos**. Brasília: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2011. 87 p.

MONTANHEIRO, T. J.; YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y. Característica e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da Serra de Itaqueri – SP. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 23, n.1, p. 13-24, 2002.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. As matérias-primas cerâmicas. parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. **Cerâmica industrial**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-12, 2001. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v06n02/v6n2_4.pdf>. Acesso em: 13 out. 2014.

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

REGO, J. H. S. **As cinzas de arroz (CCA's) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas**. 2004. 274 f. Tese (Doutorado em Engenharia civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

ROCHA, G.G.N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de

Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SERRA, G. G. **A sustentabilidade na construção civil**. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/a-sustentabilidade-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Cerâmica vermelha para construção**: telhas, tijolos e tubos. [S.l.: s.n.], 2008. 95 p.

SILVA, G.J.B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SIQUEIRA, S. L. **Análise da retenção de água e do tempo de pega de argamassas fabricadas com substituição parcial de cimento Portland por rejeitos da indústria cerâmica**. Joinville: Ed. UDESC, 2012. 79 p.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Revista Engenharia Civil**, Guimarães, v. 1, n. 15, p. 45-54, 2002.

TASHIMA, M.M. **Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del silicoaluminato de cálcico vítreo (VCAS)**. 2012. 454 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Ingeniería de La Construcción y de Proyectos de la Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2006.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia urbana) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

WADA, H. P. **Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas *in loco***. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2010.