

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA COMINÚIDO NA COMPOSIÇÃO DE
CIMENTO PORTLAND: EFEITOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E
POROSIDADE DE ARGAMASSAS**

SARHA GUSMÃO SOUZA

**BARREIRAS-BA
ABRIL 2017**

SARHA GUSMÃO SOUZA

**RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA COMINÚIDO NA COMPOSIÇÃO DE
CIMENTO PORTLAND: EFEITOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E
POROSIDADE DE ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: D.Sc. Juarez Hoppe Filho

BARREIRAS-BA

ABRIL 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

S719 Souza, Sarha Gusmão.

Resíduo de cerâmica vermelha cominuído na composição de cimento portland: efeitos na resistência à compressão axial e porosidade de argamassas. – 2017.
75f.il.

Orientador: Prof. DSc Juarez Hoppe Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das
Tecnologias, Barreiras, BA, 2017.

1. Cerâmica. I. Hoppe Filho, Juarez. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia
- Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 666.3

UFOB – Biblioteca Universitária de Barreiras

SARHA GUSMÃO SOUZA

**RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA COMINÚIDO NA COMPOSIÇÃO DE
CIMENTO PORTLAND: EFEITOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E
POROSIDADE DE ARGAMASSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em 11 de abril de 2017.

Banca Examinadora

Orientador: _____

Professor D.Sc. Juarez Hoppe Filho

Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Professor Eng.º Civil Cláudio Alex de Oliveira Pires

Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Professor M.Sc. Elier Pavón de la Fé

Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Aos que permanecem comigo, de alguma forma, durante a caminhada da vida. À meus pais, Elisete e João Vianej, meu irmão, Hidalgo, minha bisavó, Vitalina (in memoriam), minha tia avó Josefina (in memoriam), e a minha avó Anna (In memoriam) dedico esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado força e oportunidade de chegar até aqui.

Ao Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho, pela orientação, dedicação e comprometimento a essa pesquisa; pelos conhecimentos transmitidos; pelos conselhos profissionais que tanto contribuíram para a minha formação; e pela amizade e apoio dispensados durante todo o curso, o meu respeito, gratidão e admiração.

Ao Prof. Dr. Luís Gustavo Henriques do Amaral, pela orientação acadêmica durante todo o curso, pela amizade e os valiosos conselhos pessoais e profissionais.

Ao Prof. Msc. Lauriclécio Figueireido Lopes, pela amizade e apoio ao longo do curso.

Aos meus colegas Vitor Aguiar Costa e Marcos Vinicíus Cirqueira Filho, pela importante contribuição na realização dos ensaios.

À toda equipe do Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Oeste da Bahia, pela amistosa convivência e colaborações com esse trabalho.

À Retok Comercio de Materiais para Construção LTDA - ME, pela doação dos blocos cerâmico utilizado nessa pesquisa.

Aos meus pais pelo apoio financeiro e emocional ao longo da graduação.

Aos meus amigos de infância, Agner Santos Souza e Luara Marina Crisóstomo Machado, pelo incentivo constante.

Aos amigos que a graduação me deu, Guilherme Moreira Costa, Helves de Lima Guedes e Leide Herllane Ferreira do Nascimento, pelos bons momentos e apoio nas horas difíceis.

Ao Engenheiro Alan da Silva Pinto e sua equipe, pela amizade e pelos valiosos conselhos profissionais.

À Dhonathan Diego da Silva Barreto, pela companhia nos últimos dois anos.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

RESUMO

A incorporação de adições minerais na composição do cimento Portland é de suma importância, pois, além de diminuir o consumo de clínquer, aproveita os resíduos de outras atividades industriais, propiciando assim benefícios econômicos e ambientais. Nesse âmbito tem sido estimulado o aproveitamento dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD), uma vez que a construção civil é um segmento industrial que apresenta grandes taxas de geração de resíduo na sua cadeia produtiva. As adições minerais, por sua vez, trazem benefícios técnicos às propriedades das argamassas, tanto para propriedades no estado fresco quanto para o estado endurecido. A proposta desse trabalho é analisar os efeitos da substituição parcial de cimento Portland por Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) cominuído, nos teores de 15 e 25% e nas relações água/aglomerantes iguais a 0,35; 0,45; 0,55 no que tange a consistência, a resistência à compressão axial e a porosidade das argamassas. Desta forma, os métodos utilizados no estudo visaram caracterizar microestruturalmente o RCV por meio da difratometria de raios – X (DRX), onde foi identificado um tênue halo amorfo, atribuindo assim reatividade com a cal; investigar a existência de atividade pozolânica do material pelo o ensaio de pozolanicidade para cimento pozolânico – Ensaio Fratini, classificando-o como não pozolânico; identificar os produtos hidratados formados a partir da pasta de hidróxido de cálcio p.a. + RCV por meio de DRX, onde foram observados o monocarboaluminato de cálcio hidratado e o C-S-H; e acompanhar a evolução da resistência à compressão axial e da porosidade até a idade de 56 dias, em argamassas misturadas com diferentes composições de material aglomerante (cimento + RCV) e diferentes relações água/aglomerante (cimento + RCV). A utilização de RCV na composição do aglomerante reduziu a resistência à compressão e aumentou a porosidade das argamassas.

Palavras-chave: adições minerais, resíduo de cerâmica vermelha, resistência a compressão, porosidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	8
1.2 PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA	11
1.3 OBJETIVO	13
1.4 JUSTIFICATIVA	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	14
2.2 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV).....	16
2.2.1 AGREGADO RECICLADO	17
2.3 ADIÇÕES MINERAIS	18
2.3.1 ADIÇÕES MINERAIS INERTES, CIMENTANTES E POZOLÂNICAS.....	19
2.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA	20
2.5 POTENCIALIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA.....	22
2.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA	25
2.6.1 ENSAIO DE POZOLANICIDADE PARA CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO – ENSAIO FRATINI.....	25
2.6.2 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX).....	26
2.6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	27
2.7 EFEITOS DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV) NOS MATERIAIS DE BASE CIMENTÍCIA	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS	29
3.1.1 CIMENTO PORTLAND	29
3.1.2 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV).....	30
3.1.3 AGREGADO MIÚDO	33
3.2 COMPOSIÇÕES AGLOMERANTES	34
3.3 MÉTODOS	35
3.3.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X DO RCV	36
3.3.2 ENSAIO DE POZOLANICIDADE PARA CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO – ENSAIO FRATINI	36
3.3.3 PASTA DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO P.A. E RCV	36
3.3.4 ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND E RCV	39

3.3.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	42
3.3.6	POROSIDADE DAS ARGAMASSAS	43
3.3.7	SECAGEM DAS AMOSTRAS PARA DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X E POROSIDADE - LIOFILIZAÇÃO	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV)	47
4.2	ENSAIO DE POZOLANICIDADE PARA CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO – ENSAIO FRATINI	47
4.3	PRODUTOS HIDRATADOS DECORRENTES DA REAÇÃO DO RCV COM O HIDRÓXIDO DE CÁLCIO.....	49
4.4	ENSAIO DE MINI TRONCO DE KANTRO.....	51
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	52
4.6	POROSIDADE DAS ARGAMASSAS	60
4.7	RELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO X POROSIDADE	64
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
5.1	CONCLUSÕES	67
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
6.	REFERÊNCIAS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da produção de cimento do Brasil entre 1970 e 2015.	13
Figura 2 – Rejeitos de blocos cerâmicos de vedação utilizados para a produção de RCV cominuído.	30
Figura 3 – Rejeitos de blocos cerâmicos de vedação fragmentados por meio de apilador manual.	31
Figura 4 – Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado na cominuição do RCV.	31
Figura 5 – Aspecto físico do RCV cominuído.	32
Figura 6 – Distribuição granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha.	32
Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia).	34
Figura 8 – Agitador mecânico utilizado no preparo da pasta.	37
Figura 9 – Etapas sequenciais referentes ao lançamento e acondicionamento da pasta. .	38
Figura 10 – Freezer utilizado para paralisar as reações da pasta de hidróxido de cálcio e RCV.	38
Figura 11 – Ensaio de espalhamento/abatimento no mini tronco de cone de Kantro.	41
Figura 12 – Corpos-de-prova de argamassa após a desmoldagem.	42
Figura 13 – Corpo-de-prova disposto na prensa hidráulica para ensaio de resistência à compressão.	43
Figura 14 – Balança hidrostática utilizada para a determinação da massa submersa das amostras.	44
Figura 15 – Liofilizador utilizado para a secagem da amostra de pasta de hidróxido de cálcio e RCV.	45
Figura 16 – Amostras liofilizadas estocadas em dessecador contendo sílica gel.	46
Figura 17 – Perfil difratométrico da amostra do Resíduo de Cerâmica Vermelha.	47
Figura 18 – Resultado do ensaio Fratini para o cimento CP II – Z, 15% RCV e 25% RCV. ...	48
Figura 19 - Perfil difratométrico da amostra em pó constituída por 50% RCV + 50% CH...	49
Figura 20 - Perfil difratométrico da amostra constituída por 50% RCV + 50% CH, após hidratação por 56 dias.	50
Figura 21 -Perfil difratométrico comparativo das amostras anidra e hidratada de 50% do RCV + 50% CH.	50
Figura 22 – Espalhamento das pastas.	52

Figura 23 – Evolução da resistência à compressão axial das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,35.	53
Figura 24 – Evolução da resistência à compressão das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,45.	54
Figura 25 - Evolução da resistência à compressão das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,55.	55
Figura 26 – Resistência à compressão relativa à referência das argamassas contendo diferentes teores de RCV.	57
Figura 27 – Curvas de Abrams das diferentes argamassas na idade de 7 dias.	58
Figura 28 – Curvas de Abrams das diferentes argamassas na idade de 28 dias.	59
Figura 29 – Curvas de Abrams das diferentes argamassas na idade de 56 dias.	59
Figura 30 - Comportamento da porosidade em relação ao tempo, para as diferentes argamassas na relação água/aglomerantes = 0,35.	62
Figura 31 - Comportamento da porosidade em relação ao tempo, para as diferentes argamassas na relação água/aglomerantes = 0,45.	63
Figura 32 – Comportamento da porosidade em relação ao tempo, para as diferentes argamassas na relação água/aglomerantes = 0,55.	64
Figura 33 - Relação resistência X porosidade, para a argamassa de referência.	65
Figura 34 - Relação resistência X porosidade, para a argamassa 15% RCV.	65
Figura 35 – Relação resistência X porosidade, para a argamassa 25% RCV.	66

TABELAS

Tabela 1 – Características granulométricas do RCV cominuído.....	33
Tabela 2 – Composição, em massa, dos aglomerantes utilizados no estudo.	34
Tabela 3 - Tabela resumo dos métodos utilizados no trabalho.	35
Tabela 4 - Proporções de mistura das argamassas estudadas.....	40
Tabela 5 - Resultado do ensaio Fratini aos 8 e as 15 dias de idade.	48
Tabela 6 - Resistência a compressão axial média, em MPa, para as diferentes argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias.	53
Tabela 7 - Porosidade percentual média das argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias de idade.	61

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância do tema

A indústria da construção civil causa grande impacto ambiental em decorrência do consumo de recursos naturais e da extração de matérias-primas de jazidas, do consumo de energia nas fases de extração, transformação, fabricação, transporte e aplicação; da geração de resíduos decorrentes de perdas, desperdício e demolições; e, por fim, do desmatamento e de alterações no relevo (Karpinski, 2009).

Dentre os impactos ambientais inerentes à indústria da construção civil, há aqueles decorrentes dos resíduos de construção e demolição (RCD), os quais devem ser gerenciados no canteiro de obras com o intuito de mitigar possíveis degradações ambientais quando da destinação inadequada, prática, esta, corriqueiramente utilizada no Brasil.

As perdas são geradas, na maioria dos casos, por falhas no gerenciamento dos processos executivos, desde a fase inicial da obra até a fase final quando da manutenção. A falta de especificação técnica, baixa qualidade e pouco detalhamento dos projetos, falta de gestão na aquisição, transporte e estocagem e manuseio dos materiais podem levar a erros que acabam em perdas (Leite, 2001).

A inadequada destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD) resulta em problemas de saúde pública e ambiental para os municípios. A geração dos RCD's ocorre quando há desperdícios durante o recebimento, transporte e armazenamento de materiais e a execução do ambiente construído, em decorrência da falta de gestão dos métodos construtivos utilizados, e por falta de rotinas e processos de reaproveitamento e reciclagem de materiais ainda não descartados. A falta de gestão relacionada à geração e reaproveitamento/reciclagem de resíduos no canteiro de obras requer, obrigatoriamente, adequada destinação do volume gerado, o que, na maioria das vezes, não ocorre. O descarte clandestino (inadequado) pode obstruir mananciais hídricos e sistemas de esgotamento de águas servidas, além de causar impactos estéticos (visuais), ora permanentes, ora momentâneos, a depender da região de descarte e do desenvolvimento de vegetação que se sobrepõe aos resíduos. Neste último caso, a falta de visibilidade acaba por ocultar o problema e, desta forma, a sociedade deixa de atribuir a devida importância ao impacto ambiental gerado, o que é, de fato, um ato grave. Em

suma, a destinação inadequada dos resíduos fomenta a informalidade, o que possibilita a degradação de áreas de preservação ambiental e a consolidação de aterros e reaterros de áreas de forma descontrolada, atividades estas que requerem licenciamento ambiental para o armazenamento de resíduos (Bernardes *et al.*, 2008).

No que tange o gerenciamento de resíduos de construção civil, conforme estabelece a Resolução 307/2002 do CONAMA, há que se identificar, quantificar e triar o material descartado.

A identificação do RCD é uma atividade indispensável, realizada diretamente na fonte de geração, que visa facilitar as etapas subsequentes (Lyra *et al.*, 2013). A falta de informações sobre a quantidade de RCD gerado, de fato, nas construções, resulta em dificuldades para o estudo desse material devido à falta de monitoramento, principalmente em obras de pequeno porte e reformas informais. Segundo Pinto (1999), a quantificação pode ser feita de três maneiras: por área construída, por movimentação de cargas em coletores e por monitoramento de descargas.

Alguns estudos, visando estimar a geração de RCD a partir de construção foram realizados no Brasil, tais como Pinto (1999); Souza *et al.* (2004) e Careli (2008). Nesses estudos foram obtidas gerações de RCD por unidade de área (m²) de edificações verticais, variando entre 50 e 150 kg/m². Tal variação depende do controle de produção implantado em cada canteiro de obra. Com relação à geração de RCD a partir de reformas, não existem levantamentos abrangentes (Ângulo *et al.*, 2011).

Uma das formas de mitigar o passivo ambiental decorrente da indústria da construção civil é desenvolver tecnologia para reincorporar, ao processo produtivo, os resíduos que possuem características intrínsecas que permitam a sua utilização como matéria-prima para novos produtos. Assim sendo, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) têm se tornado alvo de pesquisas para o uso como agregado e também na pavimentação rodoviária, entrando como substituto às matérias-primas corriqueiramente utilizadas neste setor (Carneiro, 2001).

No Brasil, o RCD é composto por uma grande quantidade de materiais de base cimentícia e materiais cerâmicos que, ao serem cominuídos, podem apresentar características que contribuam para a melhoria das propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidos com o agregado miúdo reciclado (Leite, 2001).

O Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV), constituinte do resíduo de construção civil enquadrado na Classe A, conforme a Resolução 307/2002 do CONAMA, vem sendo escopo de pesquisas que objetivam avaliar a sua potencialidade reativa a fim de viabilizar o seu uso como adição mineral pozolânica na composição do cimento Portland. Neste sentido, destacam-se os trabalhos de Gobbi (2014), Garcia *et al.* (2014) e Garcia *et al.* (2015).

A crescente demanda por cimento Portland desafia a indústria a encontrar o equilíbrio entre a produção e a sustentabilidade, uma vez que o aumento do consumo implica em aumento dos impactos ambientais provenientes da extração das matérias-primas e do processo de clínquerização. Assim sendo, a indústria cimentícia tem por objetivo aliar a sustentabilidade à viabilidade econômica do processo produtivo e, para atingir este preceito, acaba por demandar da comunidade científica pesquisas que permitam a utilização de adições minerais na composição do cimento Portland. A substituição parcial do cimento por adições minerais acaba por reduzir o passivo ambiental decorrente da clínquerização e ainda agrega valor a resíduos provenientes de outros setores produtivos, já que estes passam a ser utilizados como matéria-prima para a produção de cimento Portland. De fato, a produção de cimento Portland pozolânico¹ incorpora a cinza volante ou a argila calcinada em teor entre 15 e 50%, conforme as diretrizes da ABNT NBR 5736/1991. Já para o cimento Portland de alto forno é possível utilizar a escória granulada de alto forno em teor compreendido entre 35 e 70%, conforme a ABNT NBR 5735/1991. Por fim, os cimentos Portland compostos podem incorporar adição pozolânica (cinza volante ou argila calcinada), adição cimentante (escória granulada de alto forno) ou adição inerte (fíler calcário), em teores estabelecidos na ABNT NBR 11578/1991. A utilização de adição inerte, ou seja, fíler calcário, é permitida em todos os cimentos Portland corriqueiramente utilizados no mercado nacional. Além destas adições minerais, ainda há disponível no mercado as adições pozolânicas de alta reatividade, sejam elas a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim, utilizadas em aplicações específicas que demandam características microestruturais e propriedades mecânicas especiais. No geral, as adições minerais são provenientes de processos

¹ Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou materiais orgânicos fossilizadas encontrados na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros (ABCP, 2002).

industriais ou agroindustriais (Cordeiro, 2006), ou seja, são resíduos de outros setores produtivos que passam a integrar a cadeia produtiva do cimento Portland.

Atualmente, a argila calcinada de composição caulínica vem assumindo destaque nas linhas de pesquisa voltadas para os materiais de base cimentícia, como mostrado nos trabalhos de Leite, 2001; Leite e Dal Molin, 2002; Vieira 2005; Garcia *et al.*, 2015; Medeiros *et al.*, 2016, sobretudo para ampliar a sua utilização na composição do cimento Portland e, desta forma, subsidiar o crescente consumo de cimento sem aumentar, proporcionalmente, os impactos ambientais decorrentes do processo produtivo. Neste contexto, um material com propriedades potencialmente similares e ainda não aproveitado como adição mineral no país refere-se ao resíduo de cerâmica vermelha (RCV) (Garcia *et al.*, 2014).

As características mineralógicas do RCV atribuem, a princípio, potencialidade para o seu uso como adição mineral, porém há que se analisarem, criteriosamente, suas características físico-químicas e os demais aspectos envolvidos na interação com o cimento Portland para viabilizar a sua utilização na composição da matriz cimentícia (Fastofski *et al.*, 2014).

Diante desta conjuntura, o presente trabalho de conclusão de curso (TCC) visa agregar conhecimento técnico-científico relacionado à utilização de RCV cominuído na composição de cimento Portland de forma a subsidiar a sua utilização como adição mineral.

1.2 Principais pesquisas relacionadas ao tema

As pesquisas apresentadas a seguir são, entre as mais relevantes, voltadas à caracterização, a atividade pozolânica e aos efeitos da substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha. Assim sendo, destaque deve ser dado aos seguintes trabalhos:

- Nascimento Júnior (2011), onde avaliou as propriedades mecânicas do concreto com adição de resíduos cerâmicos em substituição parcial ao cimento Portland, nos teores de 10%, 20% e 30%, em massa.
- Alcântara (2012), onde caracterizou, em termos de pozolanicidade, os resíduos de cerâmica vermelha; avaliou a temperatura ótima de queima da

massa conformada (verde) e requeima para os resíduos, e avaliou propriedades no estado fresco e endurecido de argamassa de assentamento com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de cerâmica vermelha.

- Garcia *et al.* (2014), com pesquisa focada nas propriedades pozolânicas de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) do Estado de São Paulo; suas relações com a composição das matérias-primas utilizadas nas indústrias (massas cerâmicas) e a temperatura de queima, com vistas ao aproveitamento do RCV como adição mineral pozolânica para cimento Portland.
- Fastofski *et al.* (2014), com a proposta de uma metodologia para avaliação do resíduo de cerâmica vermelha como pozolana.
- Gobbi (2014), com uma pesquisa de mestrado que testou as técnicas de investigação de pozolanicidade de adições minerais normatizadas no Brasil até a primeira metade de 2014. Para isso, foram utilizadas as seguintes adições minerais: cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa, fíler quartzoso, fíler calcário e material de cerâmica vermelha com diferentes graus de moagem (0,5; 1,0 e 1,5 h).
- Garcia *et al.* (2015), com estudo das propriedades cimentícias de RCV, enfatizando as propriedades pozolânicas de cerâmicas coletadas nos quatro principais polos paulistas, analisando a influência das composições das matérias-primas utilizadas (massas cerâmicas) e da temperatura de queima.
- Medeiros *et al.* (2016), onde foi avaliada a influência da incorporação do RCV moído na composição do cimento Portland sobre duas propriedades relacionadas à durabilidade do concreto: resistência à ocorrência de reação álcali-sílica (RAS) e resistência ao ataque por sulfato de sódio.

Dentre as várias pesquisas relacionadas ao uso de resíduo de cerâmica vermelha na composição de cimento Portland, foi dada ênfase às pesquisas acima referenciadas por representarem as principais publicações nacionais nos últimos 6 anos.

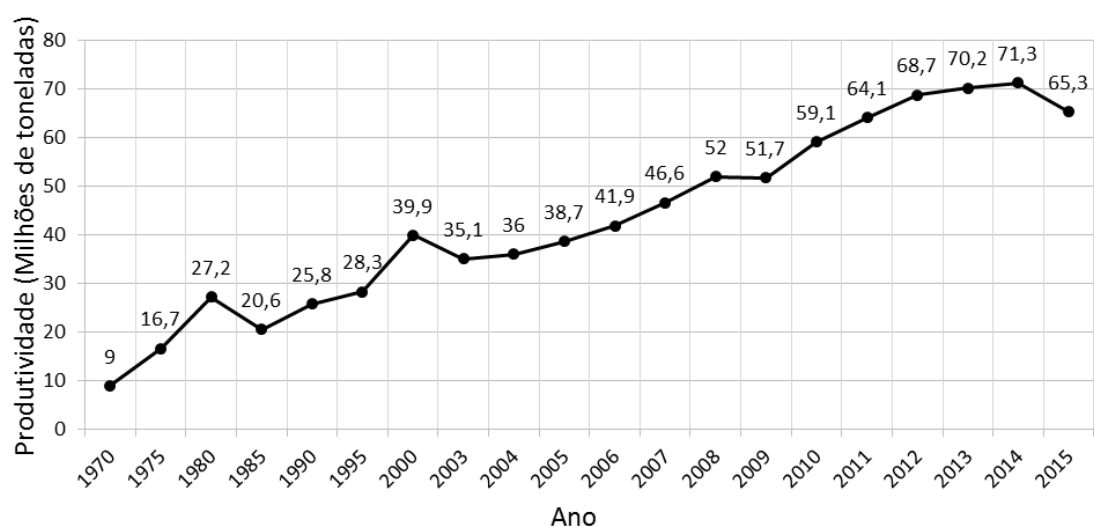
1.3 Objetivo

O objetivo do trabalho é substituir, parcialmente, o cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) cominuído e analisar a influência na resistência à compressão axial e porosidade de argamassas.

1.4 Justificativa

O aumento progressivo da produção de cimento no Brasil a partir da década de 70, conforme apresentado na Figura 1, propiciou crescentes impactos ambientais decorrentes da extração e clínquerização das matérias-primas. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2015, o consumo de cimento Portland no Brasil foi de 65,3 milhões de toneladas, o que equivale ao um consumo de 317 kg/hab.ano, considerando a população brasileira em 206 milhões de habitantes, conforme censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), realizado no primeiro semestre de 2016. A emissão média para cada tonelada de clínquer moído produzido é de aproximadamente 866 kg de gás carbônico (WBCSD, 2011), o que impacta consideravelmente no efeito estufa.

Figura 1 - Evolução da produção de cimento do Brasil entre 1970 e 2015.



Fonte: Relatórios anuais do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC

A redução destes impactos está, atualmente, relacionada à utilização de adições minerais na composição do cimento Portland, tais como: cinza volante, escória granulada

de alto forno, argila calcinada, etc. A substituição parcial do clínquer, um produto nobre, ocorre, normalmente, por subprodutos oriundos de resíduos agroindustriais (Gobbi, 2014).

Nesse âmbito, tem se realizado pesquisas voltadas para o uso do RCV como adição mineral, com base na influência da substituição parcial de cimento Portland pelo resíduo moído sobre a resistência à compressão e à tração na flexão. Nota-se que para o uso do RCV como adição mineral é necessário que o pó cerâmico tenha distribuição granulométrica compatível com a do cimento Portland, assim, além da britagem inicial, necessita de uma moagem complementar (Medeiros *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a viabilidade do uso do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) como substituição parcial ou incorporação do cimento Portland deve ser analisada sob os preceitos de reatividade e de microestrutura e durabilidade quando da sua incorporação na composição do cimento Portland.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A construção civil é grande causadora de degradação ambiental, pois além de contribuir para o esgotamento de recursos naturais, é responsável pela produção de grandes quantidades de resíduos que, em sua maioria, recebem uma destinação final inadequada (Santos *et al.*, 2010).

Resíduos da construção civil (RCC) são definidos segundo a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) como:

“Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras da construção civil, e 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, telha, pavimento asfáltico, vidros,

plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.”

Os diversos resíduos sólidos são classificados pela norma NBR 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) segundo os riscos potenciais à saúde pública e ao meio ambiente, visando manuseio e destinação final dos resíduos sólidos.

De acordo com a NBR 10.004/2004, o RCD é classificado como classe II B – Inertes. Estes resíduos são definidos como:

“Quaisquer resíduos que, quando amostrado de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10.007/2004, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10.006/2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.”

Na Resolução nº 307/2002 do CONAMA, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são classificados em quatro classes, de acordo com as possibilidades de reciclagem:

- Reutilizáveis ou recicláveis como agregado – A
- Recicláveis para outras destinações – B
- Sem tecnologia de reciclagem economicamente viável – C
- Periculosidade dos resíduos – D

Segundo Ângulo *et al.* (2004), a classe A corresponde à maior fração dos resíduos gerados, pois é constituída por materiais minerais como, argamassas, concretos, tijolos e telhas cerâmicas, rochas naturais, solos entre outros, conforme as especificações da Resolução nº 307 do CONAMA (2002).

Os Resíduos da Construção Civil (RCC) são gerados entre 0,4 e 0,7 ton./hab.ano e representam 2/3 da massa dos resíduos sólidos municipais ou em torno do dobro dos resíduos sólidos domiciliares (SINDUSCON SP, 2012).

A composição dos resíduos da construção civil é variável, e depende principalmente do local onde foi gerado e da tecnologia de construção empregada (Sardá, 2003). No Brasil, de acordo com Lucena (2005) *apud* Bernardes (2008), os resíduos de construção civil são compostos, basicamente, de tijolos, areias e argamassas (em torno de

80%). Numa menor proporção foram encontrados ainda restos de concreto (9%), pedras (6%), revestimentos cerâmicos (3%), gesso (2%) e madeira (1%). De fato, os resíduos de tijolo, argamassa e areia são os mais gerados, independentemente do tipo de obra considerada, uma vez que as suas porcentagens não variam significativamente entre um tipo e outro de empreendimento (Bernardes, 2008).

As deposições irregulares são comuns nos municípios brasileiros, diante da falta de alternativas para destinação ou disposição correta, o que provoca desperdício de materiais e elevados dispêndios para as ações corretivas.

2.2 Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV)

As cerâmicas são obtidas a partir de uma massa a base de argila, submetida a um processo de secagem lento e, após a retirada de grande parte da água até atingir umidade próxima a 1,0%, é sintetizada em temperaturas elevadas, na faixa entre 700 °C e 900 °C. Um dos critérios para a classificação das cerâmicas é a cor da massa, que pode ser branca ou vermelha (Kasmierczak, 2010).

As cerâmicas vermelhas são obtidas a partir das argilas comuns, que têm como principal característica a cor avermelhada após a queima. Essa propriedade deve-se ao alto teor de óxido de ferro total contido na argila, geralmente superior a 4,0 % (Facincani, 1992), valor que foi corroborado pelos estudos efetuados em depósitos brasileiros na região do Recôncavo Baiano (Conceição Filho e Moreira, 2001).

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV) pode ser obtido como subproduto da cadeia de produção de vários artefatos, como blocos, telhas, tubos, vasos ornamentais e utensílios domésticos, ou nos canteiros de obras como resíduo de construção e demolição (RCD).

Segundo os dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), a estimativa nacional de geração de resíduo de cerâmica vermelha (RCV), em 2014, foi de 3,9 a 6,5 milhões de toneladas. Essa estimativa não considera os resíduos de construção e demolição (RCD). A partir da estimativa apresentada pelo SINDUSCON, o Brasil produz aproximadamente 113 milhões de toneladas/ano de RCC (0,55 ton./hab.ano x 206 milhões de habitantes).

A produção nacional de cimento Portland no ano de 2015 foi de 65,3 milhões de toneladas, dos quais 34% são representados pelos cimentos do tipo CP II – Z (20%) e CP IV (14%), o que totaliza aproximadamente 22,2 milhões de toneladas. Estes cimentos incorporam adição mineral pozolânica em sua composição em teores variáveis (SNIC,2013), de acordo com os limites preconizados nas normas NBR 5.752 e NBR 11.578, respectivamente. Assumindo que o teor médio de pozolana na composição do cimento do tipo CP II – Z é de 10% e, no tipo CP IV, de 35%, a demanda aproximada de cinza volante ou argila calcinada para produção destes cimentos foi de 4,5 milhões de toneladas. Portanto, fica evidente que o passivo ambiental decorrente da cadeia produtiva da cerâmica vermelha é significativo e permite produzir cerca de 20 milhões de toneladas de cimento composto ou pozolânico (400.000 sacos de cimento). Segundo Medeiros *et al.* (2016), atestada a viabilidade da incorporação do RCV na composição do cimento Portland, a sua disponibilidade no mercado permite, no mínimo, duplicar a produção de ligante cimentício pozolânico.

As indústrias de cerâmica vermelha queimam seus produtos, usualmente na faixa de temperatura entre 700°C a 900°C. Nesse intervalo de queima, os processos de sinterização são incipientes, com alguma geração de fase vítrea e sem praticamente a formação de novas fases minerais. Em termos de transformações químicas, ocorre, em especial, a desidroxilação e amorfismo dos argilominerais, o que deve conferir a esses materiais cerâmicos, quando devidamente cominuídos, reatividade química de natureza pozolânica (Garcia *et al.*, 2014).

2.2.1 Agregado reciclado

O atual desafio da construção civil é conciliar produtividade com sustentabilidade. Para alcançar esse objetivo são necessárias mudanças culturais e comportamentais dos envolvidos no processo construtivo. Entre as formas de amenizar os problemas oriundos da geração e acúmulo de resíduos na construção civil podemos destacar a reciclagem. Para isso, a rotina de reaproveitamento dos materiais deve-se tornar comum e automática, de forma a gerar economia e reduzir os desperdícios na obra (Trindade, 2008 *apud* Wada, 2010).

O principal problema dos resíduos de construção e demolição (RCD) é a sua disposição irregular, que incentiva a criação de pontos de entulho. Já do ponto de vista financeiro, o descarte irregular onera as administrações municipais, que acabam assumindo o gerenciamento desses resíduos (Azevedo *et al.*, 2006).

Segundo o estudo realizado em 1999 por Pinto (2003), a estimativa brasileira de geração do RCD varia entre 230 a 730 kg/hab.ano, já as estimativas internacionais variam entre 130 a 3.000 kg/hab.ano (Azevedo *et al.*, 2006).

Para viabilizar a reciclagem, o RCD deve ser triado, pois é constituído de um gama de diferentes materiais com rotas distintas de reciclagem, sendo dispostos apenas os resíduos perigosos ou aqueles sem alternativa de reciclagem comercialmente disponíveis (CONAMA, 2002).

Para a caracterização dos agregados reciclados deve-se levar em consideração questões regionais, pois não há padronização dos materiais da construção no âmbito estadual e também nacional, sendo as características dos resíduos de construção de cada região diferente na sua composição física, química e mineralógica (Karpinsk *et al.*, 2009).

O agregado reciclado possui origens distintas, e isso se deve aos diferentes materiais utilizados na construção civil. Logo, faz-se necessário um controle sistemático envolvendo a sua composição e variação de suas características (Quebaud *et al.*, 1997; Zordan, 1997; Gallias, 1998 *apud* Lyra *et al.*, 2013).

2.3 Adições Minerais

Segundo Mehta e Monteiro (2008) *apud* Souza (2013), as adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, incorporados ao concreto em quantidades que variam de 20 a 70% em relação à massa de cimento Portland. Interação química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento, modificando a microestrutura do material. O efeito químico está associado à capacidade de reação da adição mineral com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ gerado durante a hidratação das fases silicato do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (Garcia *et al.*, 2014).

São geralmente utilizadas na produção de concretos e proporcionam aprimoramento das resistências mecânicas e de durabilidade. Dentre os benefícios

obtidos pelo emprego das adições minerais no concreto estão: a melhora na resistência à fissuração térmica devido ao calor de hidratação mais baixo, aumento das resistências e da impermeabilidade por refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição, e (como resultado da redução da alcalinidade) uma durabilidade maior aos ataques químicos, tais como, águas sulfatadas e expansão álcali-agregado (Metha e Monteiro, 2008 *apud* Souza 2013).

2.3.1 Adições minerais inertes, cimentantes e pozolânicas

As adições minerais podem ser classificadas em três grandes grupos, materiais inertes, materiais cimentantes e materiais pozolânicos.

- Adição mineral inerte: É um material com finura similar à do cimento Portland que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto. Este material não apresenta atividade química e sua ação está no efeito físico de preenchimento dos vazios da pasta colaborando com a hidratação dos grãos de cimento (Neville, 1997 *apud* Souza, 2013).
- Adição mineral cimentante: Possuem autohidratação lenta, porém, quando na presença de hidróxido de cálcio e gipsita (sulfato de cálcio hidratado) torna-se acelerada, devido a ativação química de antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados em razão do aumento da concentração de íons na solução já no início do processo de dissolução ou pela alteração da solubilidade dos compostos. O sulfato de cálcio hidratado não altera significativamente o pH da solução. O alumínio dissolvido é retirado da solução por combinação com o SO_4^{2-} formando a etringita $[\text{3CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{3CaSO}_4 \cdot \text{32H}_2\text{O}]$, o que propicia a diminuição do teor de Al_2O_3 no gel que cobre os grãos anidros aumenta a sua permeabilidade, aumentando consequentemente a velocidade de hidratação (John, 1995). Segundo Neville (1997) *apud* Souza (2013), adições minerais cimentantes melhoram a trabalhabilidade e tornam a mistura mais coesiva, pois possuem uma melhor dispersão das partículas e possuem superfície mais lisa,

consequentemente consomem menos água durante a mistura. A escória de alto-forno é um exemplo desse tipo de adição.

- Adição mineral pozolânica: De acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014), é um material silicoso ou silicoaluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente dividido, em presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio originando compostos com propriedades aglomerantes.

O RCV, conforme dados de literatura (Garcia *et al.* (2014); Gobbi (2014); Garcia *et al.* (2015); Medeiros *et al.* (2016)), pode apresentar potencialidade pozolânica além de exercer efeito físico sobre a hidratação do cimento Portland. O efeito físico é definido pela presença das pequenas partículas das adições, propiciando pontos extras de nucleação e maior empacotamento das partículas.

A incorporação de partículas inertes, de dimensão similar ou inferior as partículas do ligante, no sistema cimentício, altera a cinética de hidratação das fases do cimento. As finas partículas do material inerte propiciam pontos extras de nucleação, com precipitação de hidratos sobre a superfície dos grãos inertes, além do próprio cimento (Hoppe Filho, 2008).

Já o empacotamento de partículas se refere à correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente, ocasionando redução na porosidade do sistema (McGeary, 1961 apud Barbosa, 2008).

Assim, será abordado neste trabalho apenas a atividade pozolânica, desconsiderando comentários sobre as adições minerais inertes e cimentantes.

2.4 Atividade pozolânica

Segundo Coutinho (1997), Neville (1995) e Metha e Monteiro (1994) *apud* Nascimento Júnior (2011), as pozolanas são substâncias constituídas de sílica e alumina que, em presença de água, combinam-se com o hidróxido de cálcio e com os diferentes

componentes do cimento Portland formando compostos estáveis e com propriedades aglomerantes.

Segundo a ABNT NBR 12.653 (2014), as pozolanas são classificadas em função da origem, como:

- Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica;
- Pozolanas artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica;
- Argilas calcinadas: materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500 e 900°C, de modo a garantir sua reatividade com hidróxido de cálcio.
- Cinzas volantes: resíduo finamente divididos com atividade pozolânica que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado;
- Outros minerais: materiais não tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais e rejeito de carvão mineral.

A NBR 12.653 (ABNT, 2014) também classifica os materiais pozolânicos segundo suas características físicas e químicas, em três classes, são elas:

- Classe N: enquadram tanto pozolanas naturais quanto artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- Classe C: cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
- Classe E: pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), do ponto de vista da durabilidade e impermeabilidade, os efeitos da reação pozolânica são, provavelmente, mais significativos em concreto do que em pasta endurecida de cimento, pois a permeabilidade do concreto é muito maior devido às microfissuras da zona de transição. Entende-se por zona de transição, a interface entre o agregado e a pasta, com espessura de aproximadamente 1/20 mm. Em concretos de cimento Portland, a zona de transição é geralmente mais porosa do que a pasta e contém uma grande quantidade de cristais de

hidróxido de cálcio, o que torna esta zona mais frágil e, quando sujeita a tensões, facilmente microfissura. Assim sendo, a incorporação de adições minerais assume um papel importante, uma vez que são capazes de melhorar as características da zona de transição em decorrência da atividade pozolânica. Tecnicamente, as adições pozolânicas oferecem três aspectos, são eles (Mehta e Monteiro, 2008):

- Reação lenta e, por consequência, a liberação de calor devido às reações de hidratação também será lenta;

- As reações dos materiais silicosos amorfos/vítreos consomem hidróxido de cálcio ao invés de produzi-lo, contribuindo para a resistência da pasta frente à ação de soluções agressivas;

- A reação entre a sílica solubilizada da pozolana e o hidróxido de cálcio presente na solução aquosa contida nos poros do concreto formam o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O produto desta reação (C-S-H) atua no preenchimento dos espaços capilares da matriz hidratada.

2.5 Potencialidade pozolânica do resíduo de cerâmica vermelha

A potencialidade pozolânica de uma determinada adição mineral pode ser avaliada por meio de ensaios diretos ou indiretos. Os ensaios diretos avaliam, sobretudo, o consumo de hidróxido de cálcio por atividade pozolânica, ou seja, o teor de cal fixado na formação de compostos hidratados. Esses ensaios diferem quanto à metodologia experimental, abrangendo a reação em estado estático ou dinâmico, temperatura de reação, proporção de mistura, idades de ensaio e cinética de reação. Já os ensaios indiretos se baseiam na resistência mecânica de argamassa de cal ou cimento, misturadas em proporções pré-estabelecidas e curadas em condições controladas, estabelecendo limites mínimos para a atribuição de caráter pozolânico à adição mineral analisada.

De fato, é de interesse tecnológico avaliar as adições minerais quanto à potencialidade pozolânica por mais de um método, de forma a realizar análise mais ampla no que tange o consumo de hidróxido de cálcio e os efeitos sobre a resistência à compressão.

Dentre os métodos diretos podem ser citados o ensaio Chappelle modificado (NBR 15.895/2010), o ensaio Fratini (NBR 5.753/2016) e os estudos em pasta de cimento ou cal

em condição normal de reação (temperatura ambiente), onde a cinética de reação pode ser acompanhada por análise termogravimétrica (TG/DTG) e/ou difratometria de raios-X (DRX) (Nita e John, 2007). Os ensaios indiretos são normalizados por meio da norma NBR 5.751/2015, a qual determina a atividade pozolânica com cal aos 7 dias, e a norma NBR 5.752/2014, a qual determina o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland estão estabelecidos na NBR 12.653/2014.

Dal Molin e Leite (2002) realizaram estudos utilizando resíduo de cerâmica vermelha a fim de investigar a sua atividade pozolânica por meio da norma NBR 5.752/1992. À época, a versão em vigor da norma NBR 12.653 exigia que a resistência à compressão de argamassa com a substituição de 35% do volume absoluto de cimento Portland por material pozolânico deveria atingir, no mínimo, 75% da resistência à compressão da argamassa de referência, composta somente por cimento. A quantidade de água de mistura das argamassas era variável em virtude da norma estabelecer uma consistência fixa, o que tende a reduzir a resistência à compressão da argamassa com material pozolânico a depender das suas características físico-químicas. O resultado, denominado índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland, foi de 87,2%, o que atribuiu caráter pozolânico ao RCV.

Farias Filho *et al.* (2000), ao avaliar a substituição parcial do cimento por tijolo queimado moído, em pasta, nos teores entre 20 e 40%, em massa, obtiveram aumento da resistência à compressão comparado à referência, porém para teores de substituição acima de 20%, houve decréscimo na resistência à tração na flexão.

No trabalho de Garcia *et al.* (2014) foi analisada a reatividade do RCV e constatado que a capacidade desse resíduo em fixar cal, quando as partículas são inferiores à 75 μm , classifica o material como pozolânico, com consumo de cal similar ao observado para a cinza volante, utilizada na composição do cimento Portland pozolânico. A reatividade das amostras de RCV foi avaliada por meio do ensaio Chapelle modificado, onde o teor mínimo de cal fixada para a classificação como pozolana é de 436 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /grama de adição mineral ensaiada, conforme proposição de Raverdy *et al.* (1980). Os resultados variaram entre 570 e 650 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /grama de RCV a depender da procedência do resíduo.

A pesquisa realizada por Gobbi (2014) avaliou a reatividade de RCV submetido a diferentes tempos de moagem em moinho de bolas. A moagem, realizada após a fragmentação prévia de blocos de cerâmica vermelha, demandou tempos de 0,5; 1,0 e 1,5 horas. De fato, o maior tempo de moagem resultou em partículas menores, o que exerce influência direta na reatividade do material. A caracterização do RCV por difratometria de raios-X indicou a presença de fração amorfa na composição do material cominuído, o que o torna passível de reação com o hidróxido de cálcio. A capacidade de fixar cal por atividade pozolânica do RCV foi quantificada por meio do ensaio Chapelle modificado (NBR 15.895/2010). Os consumos variaram, para tempos crescentes de moagem, entre 454 e 537 mg Ca(OH)₂/grama de RCV, o que atribui caráter pozolânico ao material ensaiado, independentemente da finura testada, pois o teor de cal fixado foi superior ao mínimo de 436 mg Ca(OH)₂/grama de adição, proposto por Raverdy *et al.* (1980). As mesmas amostras, testadas por meio de ensaios indiretos de avaliação da pozolanicidade, não foram classificadas como adição mineral pozolânica. O ensaio de IAP com cal, realizado a partir da NBR 5.751/2012 (em vigor à época), resultou em resistência à compressão de 3,0; 3,8 e 4,8 MPa para teores crescentes de moagem. A NBR 12.653/2012 (em vigor à época) estabelecia uma resistência à compressão mínima de 6,0 MPa para a atribuição de pozolanicidade ao material ensaiado. No ensaio de IAP com cimento, realizado a partir da NBR 5.752/2012 (em vigor à época), os resultados de resistência à compressão foram 24,8; 27,1 e 31,0 MPa, enquanto a argamassa de referência, somente com cimento CP V – ARI, apresentou resistência à compressão de 42,1 MPa. A NBR 12.653/2012 (em vigor à época) estabelecia que a resistência à compressão da argamassa contendo a adição mineral ensaiada deveria ser de, no mínimo, 75% do valor apresentado pela referência. Assim sendo, o valor mínimo deveria ser de 31,6 MPa, o qual não foi atingido pelas argamassas contendo RCV, independentemente do tempo de moagem.

Diante dos resultados apresentados por Gobbi (2014), fica evidente que o RCV, ao ser avaliado por diferentes metodologias, pode ser classificado, ou não, como adição mineral pozolânica. No caso apresentado, o ensaio Chapelle modificado, conforme a NBR 15.895/2010, atribuiu baixa reatividade ao RCV, pois os resultados superaram o consumo mínimo de cal entre 4 e 23% para tempos crescentes de moagem. A baixa reatividade determinada no ensaio Chapelle modificado impactou negativamente sobre os resultados

referentes aos ensaios indiretos de avaliação da reatividade, baseados na resistência à compressão axial de argamassas. De fato, a pequena capacidade de fixar cal por atividade pozolânica do RCV resultou em resistência à compressão das argamassas, tanto de cal como de cimento, abaixo dos limites mínimos preconizados na norma pertinente. Assim sendo, há que se classificar uma adição mineral com cautela, haja vista a possibilidade de disparidade de resultados a partir de metodologias avaliativas distintas.

2.6 Métodos de avaliação da atividade pozolânica

Os métodos químicos normalmente utilizados para a determinação da potencialidade pozolânica de uma determinada adição mineral são o ensaio Chapelle modificado, preconizado na NBR 15.895/2010, e o ensaio Fratini, descrito na norma NBR 5.753/2016. O acompanhamento da cinética de reação, a partir da evolução dos compostos hidratados formados, pode ser realizado por difratometria de raios-X e análise termogravimétrica. Por fim, a atividade pozolânica por ser avaliada pela evolução da resistência à compressão ao longo do tempo (Nita e John, 2007).

No transcorrer do texto serão abordados o ensaio Fratini, a difratometria de raios-X e o ensaio de resistência à compressão axial por fazerem parte do escopo deste trabalho. Além destes, também será abordada a porosidade de sistema cimentício, haja vista a realização deste ensaio nas argamassas estudadas.

2.6.1 Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico – ensaio Fratini

As diretrizes para a realização do ensaio Fratini constam da norma NBR 5.753/2016. O ensaio constitui um método químico que permite classificar se uma adição mineral a ser utilizada na composição do cimento Portland, em um determinado teor, possui reatividade capaz de atribuir caráter pozolânico ao cimento Portland ensaiado. Para tanto, há que se compor previamente o cimento a ser avaliado para, então, realizar o ensaio propriamente dito. O cimento Portland contendo a adição mineral é misturado à água em relação água/sólidos (cimento + adição mineral) igual a 5,0 (excesso de água) e mantido sob cura térmica a 40 °C durante o período mínimo de 8 dias. A atividade pozolânica da adição mineral, ao consumir a portlandita, impacta na concentração de íons hidroxila em solução, ou seja, na alcalinidade (pH) da solução aquosa.

O ensaio Fratini, conforme as recomendações da norma, avalia a pozolanicidade de um determinado cimento pela comparação entre a concentração de íons cálcio presente na solução aquosa em contato com o cimento hidratado, em idade pré-estabelecida, com a quantidade de íons cálcio capaz de saturar uma solução de mesma alcalinidade (pH). O cimento é considerado pozolânico quando a concentração de íons cálcio em solução é menor que a concentração de saturação.

A concentração de íons cálcio presente na solução em contato com o cimento hidratado atinge o equilíbrio, conforme as condições de ensaio estabelecidas na norma, entre 8 e 15 dias de hidratação. Portanto, estas constituem as idades de determinação da concentração de íons hidroxila (pH) e cálcio em solução. Caso o ensaio realizado na idade de 8 dias atribua pozolanicidade ao cimento, não é necessário realizar o ensaio de 15 dias.

O ensaio consiste, basicamente, no preparo de duas amostras, da seguinte forma: 20 gramas de cimento são imersos em 100 mL de água, a 40 °C, contida em um *Erlenmeyer* de polipropileno (PP) com tampa. Os frascos contendo as amostras são submetidos à cura térmica (40 °C) durante 8 dias, no mínimo. No oitavo dia, uma das amostras é retirada da cura térmica e filtrada a vácuo. Da solução filtrada é retirada uma alíquota para a realização de titulação para a determinação da concentração de íons hidroxila e, posteriormente, da concentração de óxido de cálcio. Sendo o cimento classificado como pozolânico, pode-se desprezar a segunda amostra ou ensaiá-la, também no oitavo dia, para comprovar o resultado obtido. No caso de classificação do cimento como não pozolânico, há que se realizar o ensaio da segunda amostra na idade de 15 dias, a fim de comprovar a pozolanicidade ou não do cimento ensaiado.

2.6.2 Difratomia de Raios-X (DRX)

A técnica de difração de raios-X (DRX) é um método de identificação das fases cristalinas presentes em um material. Para tanto, é necessário dispor da análise química dos materiais constituintes da amostra e, ter ciência, aproximada, da composição do mesmo. A análise é realizada por meio de comparação do perfil difratométrico do material ensaiado com fichas cristalográficas de referência.

A DRX pode ser utilizada para a caracterização de materiais pulverulentos corriqueiramente utilizados na construção civil e também para acompanhar a cinética de reação de adição mineral pozolânica. A atividade pozolânica se caracteriza pelo

consumo de hidróxido de cálcio (portlandita) para a formação de compostos hidratados. Assim sendo, é possível acompanhar a evolução da atividade pozolânica por meio da variação da intensidade dos principais picos da portlandita, localizados em $34,089^\circ 2\theta$, $18,089^\circ 2\theta$, $47,124^\circ 2\theta$ e $50,795^\circ 2\theta$ (Lea, 1971 *apud* Nita e John, 2007).

A hidratação do cimento Portland produz, como resultado de reação das fases alita (C_3S) e belita (C_2S), a portlandita. O teor de portlandita aumenta progressivamente ao longo do tempo em função do grau de hidratação do cimento Portland. A utilização de adição mineral pozolânica na composição do cimento Portland propicia o gradual consumo de portlandita em decorrência da atividade pozolânica e, conseqüentemente, há a redução da intensidade dos principais picos da portlandita identificados no perfil difratométrico. Portanto, a atividade pozolânica pode ser avaliada, qualitativamente, em sistemas compostos por hidróxido de cálcio e pozolana ou cimento Portland com a incorporação de pozolana.

2.6.3 Resistência à compressão axial

O estudo da atividade pozolânica é realizado, na maioria das vezes, pelo acompanhamento da evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. A adoção desta prática experimental decorre da fácil execução e, sobretudo, do valor agregado relativamente baixo quando comparado aos ensaios diretos. A principal desvantagem atrelada a esta metodologia está na impossibilidade em distinguir os efeitos físico e químico decorrentes da presença da pozolana no sistema cimentício sobre a resistência à compressão da matriz hidratada. Assim sendo, as proposições racionais para a melhoria de desempenho do sistema cimentício é bastante dificultada (Nita e John, 2007).

A vantagem da metodologia está na possibilidade de determinação, a partir da evolução da resistência à compressão, de teor ótimo de substituição parcial de cimento por determinada pozolana. O teor ótimo é obtido por meio de incremento gradual do teor de substituição do cimento pela pozolana estudada e a análise dos efeitos sobre a evolução da resistência à compressão do sistema cimentício. Convém salientar que a realização de processo de cura adequado é fundamental para evitar a carbonatação dos corpos-de-prova e, conseqüentemente, garantir que o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação das fases silicato (alita e belita) que constituem o clínquer esteja disponível para a atividade pozolânica. A cura normalmente é realizada por meio da submersão dos

corpos-de-prova em água saturada de cal. A retirada dos corpos-de-prova da cura deve ocorrer momentos antes da realização do ensaio (Nita e John, 2007).

A atividade pozolânica também pode ser acompanhada por meio da evolução da resistência à compressão de pastas ou argamassas compostas de pozolana e cal hidratada (ou hidróxido de cálcio p.a.), em proporções variadas. A reação da pozolana com a cal resulta em compostos hidratados que atribuem resistência ao sistema estudado. Tal resistência é diretamente relacionada à reatividade da pozolana ensaiada.

2.7 Efeitos do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) nos materiais de base cimentícia

O Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV), quando usado como adição mineral na composição do cimento Portland, pode apresentar características pozolânicas. O desempenho de uma pozolana na argamassa depende de fatores como o teor de substituição de cimento, composição química, teor de amorfos, índice de atividade pozolânica, diâmetro médio, forma e massa específica. A proporção de materiais constituintes da argamassa, o tipo de cimento e de agregado, os aditivos utilizados, o grau de hidratação em determinada idade também exercem influência no desempenho da pozolana (Gonçalves, 2005).

A reação pozolânica apresenta como características principais: reação lenta, o que implica em menor taxa de liberação de calor de hidratação e menor incremento de resistência à compressão ao longo do tempo. Os produtos da atividade pozolânica são eficientes em refinar os espaços capilares, melhorando a resistência à compressão e a impermeabilidade do produto final (Metha e Monteiro, 2008 *apud* Gobbi, 2014).

Na substituição do cimento Portland pelo RCV, há redução no teor de cimento no sistema e, como resultado, o hidróxido de cálcio disponível para a reação pozolânica diminui. Tal situação é potencializada quanto maior o teor de RCV no sistema cimentício, o que pode propiciar que partículas da pozolana não entrem em contato com o CH, passando a atuar como partícula inerte e, conseqüentemente, o teor de produtos hidratados no sistema é reduzido (Gonçalves, 2005).

Na pesquisa de Medeiros *et al.* (2016), o Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) cominuído foi classificado como adição pozolânica quando avaliado pelo ensaio Chapelle

modificado, apesar dos resultados dos ensaios de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) não atribuírem pozolanicidade ao material cerâmico.

Nos trabalhos de Garcia *et al.* (2014) e Garcia *et al.* (2015), o RCV também foi classificado como adição pozolânica quando avaliado por meio do ensaio Chapelle modificado. Na primeira pesquisa, as amostras ensaiadas apresentaram um consumo médio de 612 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$, suplantando em 40,0% o valor mínimo estabelecido para a classificação como pozolana (436 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$). Já no segundo trabalho, as amostras ensaiadas apresentaram um consumo médio de 500 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ no ensaio Chapelle modificado, superando em 14,7% o valor de consumo mínimo.

Os resultados apresentados no trabalho de Medeiros *et al.* (2016), também evidenciaram que o Resíduo de Cerâmica Vermelha causou aumento na expansão por RAS e, na maior parte dos casos, também aumentou a expansão devido ao ataque por sulfato de sódio. Em contrapartida, no maior grau de cominuição (maior finura) do RCV, houve uma tendência à melhora do desempenho da matriz cimentícia frente às ações deletérias a que foi submetida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os materiais utilizados na etapa experimental deste trabalho, além dos métodos empregados para cumprir o objetivo proposto, ou seja, avaliar a influência da substituição parcial de cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) sobre a resistência à compressão e porosidade de argamassas.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado no presente trabalho foi do tipo CP II – Z – 32, da marca Ciplan, de acordo com a norma ABNT NBR 11.578 (1991). A massa específica do cimento, determinada por meio da norma ABNT NBR NM 23 (2001), foi de 3,0 g/cm³. A

escolha deste tipo de cimento para a realização do presente estudo ocorreu em virtude da sua ampla utilização na região do município de Barreiras, Bahia.

3.1.2 Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV)

O RCV utilizado foi obtido a partir da cominuição de rejeitos recolhidos em estabelecimento de comercialização de blocos cerâmicos de vedação, no município de Barreiras, Bahia. Os blocos apresentavam, visualmente, as mesmas características físicas e encontravam-se limpos. Convém salientar que os blocos utilizados foram danificados quando do transporte e estocagem no pátio do estabelecimento comercial. A Figura 2 apresenta as peças danificadas de cerâmica vermelha utilizadas para a produção do RCV cominuído.

Figura 2 – Rejeitos de blocos cerâmicos de vedação utilizados para a produção de RCV cominuído.



Fonte: Própria.

Os rejeitos cerâmicos foram, em um primeiro momento, fragmentados com apiloador (adensador) manual corriqueiramente utilizado em obras de construção civil, para obtenção de fragmentos com dimensão máxima de aproximadamente 25 mm, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Rejeitos de blocos cerâmicos de vedação fragmentados por meio de apiloador manual.



Fonte: Própria.

Na sequência, os fragmentos foram moídos em equipamento de abrasão Los Angeles da marca AMC, o qual submete o tambor a uma rotação de 33 rpm. Como meio de impacto sobre os fragmentos de cerâmica vermelha foram utilizadas 12 esferas de aço, com diâmetro de 46,66 mm e 445 gramas cada. A carga de fragmentos cerâmicos utilizada para a moagem foi de 10 kg e o tempo de moagem foi de 3,5 horas, o que totaliza 6.930 revoluções. A Figura 4 apresenta o equipamento de abrasão Los Angeles utilizado na cominuição do RCV.

Figura 4 – Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado na cominuição do RCV.



Fonte: Própria.

O aspecto do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) após a cominuição no equipamento de abrasão Los Angeles é apresentado na Figura 5.

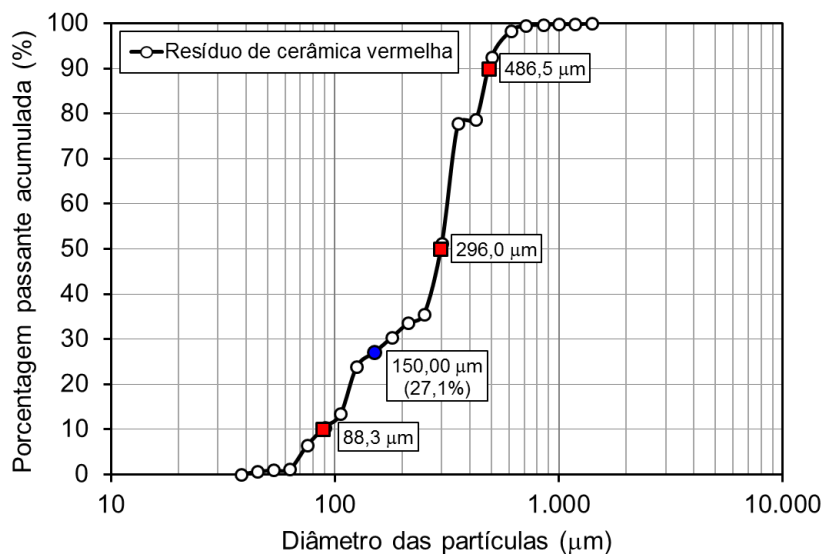
Figura 5 – Aspecto físico do RCV cominuído.



Fonte: Própria.

A massa específica do RCV, determinada em triplicata, foi de $2,56 \text{ g/cm}^3$. A distribuição granulométrica do RCV, realizada por peneiramento em agitador eletromagnético, é apresentada na Figura 6. A cominuição por meio do equipamento de abrasão Los Angeles resultou em percentual de 27,1 % de partículas com dimensão inferior a $150 \mu\text{m}$. Esta abertura de malha representa a peneira mais fina da série normal utilizada na caracterização de agregado miúdo (areia). Portanto, a maior parte do RCV (72,9 %) possui dimensão que o caracteriza como agregado miúdo. Desta forma, a reatividade referente à estas partículas passa a ser mínima.

Figura 6 – Distribuição granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Própria.

A Tabela 1 apresenta o diâmetro máximo característico do RCV, os diâmetros referentes a 90%, 50% e 10% da massa das partículas e, por fim, o percentual referente às partículas com dimensão inferior a 75 μm . A relevância da indicação do percentual das partículas com dimensão inferior a 75 μm está na similaridade com as partículas do cimento Portland, o qual deve conter, no máximo, 12 % das partículas como resíduo na peneira com abertura de malha de 75 μm .

Tabela 1 – Características granulométricas do RCV cominuído.

Granulometria	D_{máx.}	D_{90,0%}	D_{50,0%}	D_{10,0%}	D_{6,4%}
Diâmetro (μm)	1.180,0	486,5	296,0	88,3	≤ 75

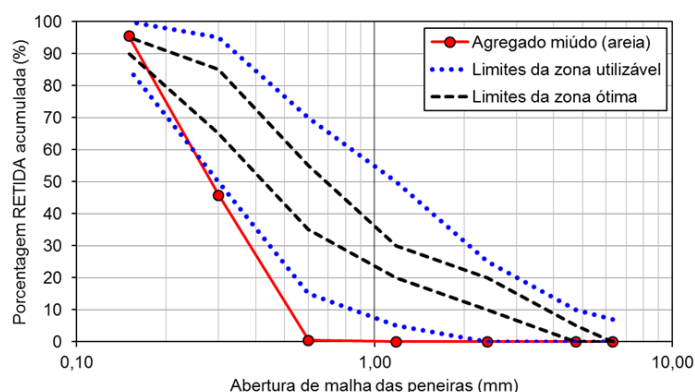
Fonte: Própria.

O percentual de partículas com diâmetro inferior a 75 μm foi de 6,4 %. De acordo com Garcia *et al.* (2015), as partículas com dimensão inferior a 75 μm são capazes de apresentar reatividade suficiente para atribuir-lhes pozolanicidade. Portanto, o RCV utilizado neste trabalho tende, *a priori*, a apresentar baixa reatividade.

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a composição das argamassas foi adquirido no comércio do município de Barreiras (BA) e apresenta características típicas de areia extraída de leito de rio. A massa específica da areia, determinada em triplicata, é de 2,57 g/cm^3 . A massa unitária no estado solto, também determinada em triplicata, é de 1,51 g/cm^3 . Com base nestas características físicas, obtém-se a porosidade da estrutura granular, a qual é de 41,2 %. A distribuição granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia).



Agregado miúdo:

Diâmetro máximo característico: 0,60 mm

Módulo de finura: 1,42

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona utilizável proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

Fonte: Própria.

3.2 Composições aglomerantes

O objetivo do presente estudo é substituir, parcialmente, o cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e analisar a influência na resistência à compressão e porosidade de argamassas. A substituição parcial do cimento ocorreu em massa, nos teores de 15 e 25%, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição, em massa, dos aglomerantes utilizados no estudo.

Mistura	Cimento Portland CP II – Z – 32	Resíduo de cerâmica vermelha cominuído
Referência	100 %	---
15% RCV	85 %	15 %
25% RCV	75 %	25 %

Fonte: Própria.

O cimento CP II – Z deve conter, conforme estabelece a norma ABNT NBR 11.578 (1991), um teor de pozolana na composição entre 6 e 14%. De fato, a aquisição de um cimento comercial dificulta a determinação do teor de pozolana e, desta forma, ao pressupor-se que o teor mínimo faz parte da composição, ou seja, 6%, é possível afirmar que a substituição parcial do cimento por teores de 15 e 25% de RCV resultaria em teores teóricos de adição mineral de 21 e 31%, respectivamente. Desta forma, o cimento composto do tipo CP II – Z passaria a ser do tipo CP IV, ou seja, cimento Portland pozolânico, a depender da reatividade do RCV. As condições exigíveis para o cimento

pozolânico constam da ABNT NBR 5736/1991, sendo que o teor de pozolana deve variar entre 15 e 50% da massa do cimento Portland pozolânico. Portanto, a inclusão do RCV na composição do cimento Portland do tipo CP II – Z nos teores propostos neste estudo aumenta o teor de adição mineral no material aglomerante, podendo atingir 39% quando da substituição parcial no teor de 25%, considerando que o mesmo já contenha 14% de pozolana.

Cabe enfatizar que é imprescindível avaliar a reatividade, ou seja, a capacidade do RCV em fixar cal por atividade pozolânica, para que seja atribuído a denominação de cimento Portland pozolânico ao material composto em laboratório. Esta avaliação consta do escopo deste trabalho.

3.3 Métodos

Os métodos utilizados para avaliar a reatividade do RCV e analisar a influência da substituição parcial do cimento por este material sobre a resistência à compressão e porosidade de argamassas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Tabela resumo dos métodos utilizados no trabalho.

Método	Objetivo
Difratometria de raios-X (DRX)	Identificar a existência de fração amorfa na composição do RCV.
Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico - ensaio Fratini	Avaliar a capacidade do RCV em fixar cal por atividade pozolânica
Preparo de pasta de hidróxido de cálcio p.a. e RCV	Identificação dos produtos hidratados formados
Preparo de argamassas com diferentes composições de material aglomerante (CP II – Z – 32 + RCV) e diferentes relações água/aglomerantes (CP II – Z – 32 + RCV)	Estudar da evolução da resistência à compressão axial e porosidade aos 7, 28 e 56 dias de idade.

Fonte: Própria.

Os ensaios foram realizados nos Laboratórios da Universidade Federal do Oeste da Bahia, *Campus* Barreiras.

O detalhamento de cada um dos métodos utilizados na realização do planejamento experimental é apresentado a seguir.

3.3.1 Difractometria de raios-X do RCV

O preparo da amostra para a aquisição do perfil difratométrico foi realizado por prensagem manual do pó de RCV no porta-amostra, seguido de exposição aos raios-X no difratômetro RIGAKU modelo Ultima IV. A análise foi realizada entre 5º e 75º 2θ, com passo angular de 0,02º 2θ e tempo por passo de 1 segundo. Na aquisição se utilizou tubo com ânodo de cobre, 40 kV / 30 mA, e fenda divergente de 1º. O equipamento utilizado integra a infraestrutura disponível na Universidade Federal do Oeste da Bahia.

3.3.2 Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico – Ensaio Fratini

As diretrizes para a realização do ensaio Fratini constam da norma NBR 5.753/2016. A classificação da reatividade do RCV, por meio deste ensaio químico, demandou o preparo prévio das amostras a serem submetidas à reação ao longo de 8 e 15 dias para posterior titulação da solução em contato com o material aglomerante (cimento + RCV). Maiores detalhes referente a este método constam do item 2.6.1 deste trabalho.

As amostras contendo RCV em teores de 15 e 25% de substituição do cimento Portland do tipo CP II – Z foram previamente homogeneizadas e, em conjunto com o cimento, foram submetidas ao ensaio.

Os diferentes materiais aglomerantes, ao constituírem duas amostras, foram misturados com água, na relação água/sólidos (cimento + RCV) igual a 5,0, e mantidos sob cura térmica a 40 °C durante o período de 8 e 15 dias, idades que em foram ensaiados.

Os resultados da titulação para a determinação da concentração de íons hidroxila e, posteriormente, da concentração de óxido de cálcio, nas diferentes idades, foram comparados à curva de saturação que estabelece se o material aglomerante ensaiado possui caráter pozolânico ou não pozolânico.

3.3.3 Pasta de hidróxido de cálcio p.a. e RCV

O preparo de pasta composta por 50% de hidróxido de cálcio p.a. e 50% de RCV, em massa, na relação água/sólidos igual a 0,55, objetivou identificar, aos 56 dias, os produtos hidratados formados decorrentes da reatividade do RCV, por meio de difratometria de

raios-X. A proporção de mistura da pasta visou garantir disponibilidade de cal para a reação do RCV sem que houvesse o esgotamento de hidróxido de cálcio no sistema.

A mistura da pasta foi realizada em um agitador mecânico da marca Fisatom, modelo 715, a uma rotação de 1.500 rpm por um tempo de 2 minutos. O equipamento é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Agitador mecânico utilizado no preparo da pasta.



Fonte: Própria.

A água de mistura foi completamente lançada no recipiente polimérico e, na sequência, o pó (hidróxido de cálcio + RCV), previamente homogeneizado, foi lançado sobre a água, mantendo-se a mistura durante dois minutos.

Ao término na mistura, a pasta foi lançada em saco plástico ocupando aproximadamente 25 mL e acondicionada em recipiente polimérico de 50 mL, com tampa para, então ser submetida à condição submersa em água destilada. As etapas do preparo da pasta são apresentadas, de forma meramente ilustrativa, na Figura 9. A amostra foi mantida em temperatura ambiente até 56 dias, idade em que foi retirada da água e do saco plástico e fragmentada em pedaços de aproximadamente 5,0 mm de aresta. Os fragmentos foram estocados no recipiente polimérico previamente utilizado para o acondicionamento da pasta e submetidos à uma temperatura de -30 °C em freezer especial para a paralisação das reações. O freezer utilizado é apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Etapas sequenciais referentes ao lançamento e acondicionamento da pasta.



Fonte: Própria.

Figura 10 – Freezer utilizado para paralisar as reações da pasta de hidróxido de cálcio e RCV.



Fonte: Própria.

O ensaio de difratometria de raios-X para a identificação dos produtos hidratados formados foi realizado, neste caso, em pasta endurecida que foi seca por liofilização e

pulverizada em almofariz cerâmico com o auxílio de pistilo cerâmico. A secagem por liofilização da amostra congelada é descrita em detalhes no item 3.3.7, haja vista esta técnica ter sido amplamente utilizada para a secagem das amostras destinadas à determinação da porosidade, onde a massa seca da argamassa sem a degradação da microestrutura é imprescindível para a determinação do volume de vazios contidos no sólido.

O preparo da amostra de pasta seca e pulverizada para o ensaio de difratometria de raios-X ocorreu exatamente como descrito no item 3.3.1 deste trabalho.

3.3.4 Argamassas de cimento Portland e RCV

O estudo em argamassa está fundamentado na substituição parcial do cimento Portland por RCV, nos teores de 15 e 25% em massa, e os efeitos sobre a resistência à compressão axial e porosidade do sistema cimentício. Em um primeiro momento, um estudo prévio foi elaborado para determinar a relação água/materiais secos (H) a ser utilizada na execução das argamassas, de forma a alterar minimamente a consistência entre as argamassas misturadas com diferentes relações água/aglomerante (cimento + RCV).

A lei de Lyse estabelece que a constância da relação água/materiais secos (H), independentemente da relação água/cimento, porém dentro da faixa de concretos plásticos, implica em abatimentos no tronco de cone (*slump test*) similares para relações entre agregados e aglomerante variáveis. A referida lei foi estabelecida para concretos e, neste trabalho, foi extrapolada para argamassa, que após uma análise experimental prévia da consistência, através do ensaio de mini tronco de cone de Kantro, resultou em uma relação água/materiais secos de 18% para uma consistência adequada para a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de $\varnothing 5 \times 10$ cm. A lei de Lyse é representada pela Equação 1.

$$H = \frac{a/c}{(1+m)} \times 100$$

Equação 1

H – Relação água/materiais secos (%);
a/c – Relação água/cimento da argamassa (kg/kg);
m – Relação agregados¹/material aglomerante (kg/kg).

¹ Conceitualmente, “m” refere-se à soma de agregado miúdo (a) e agregado graúdo (p). Como este trabalho

trata de argamassa, “m” refere-se exclusivamente ao agregado miúdo.

As argamassas estudadas, independentemente da composição do material aglomerante, foram misturadas nas relações água/aglomerantes (cimento + RCV) 0,35; 0,45 e 0,55. As relações água/cimento utilizadas constituem variáveis independentes, haja vista terem sido fixadas preliminarmente para a determinação das variáveis dependentes. Desta forma é possível avaliar a alteração decorrente da utilização do RCV, em diferentes teores da composição do material aglomerante, sobre a consistência das argamassas.

A partir da determinação preliminar da relação água/materiais secos ($H = 18\%$) e de posse das relações água/aglomerante previamente fixadas (0,35; 0,45 e 0,55), é possível estabelecer a relação agregado miúdo/aglomerante a partir da Equação 1. Na Tabela 4 estão apresentadas as proporções de mistura executadas no presente estudo.

Tabela 4 - Proporções de mistura das argamassas estudadas.

Argamassa	Proporção de mistura unitária (massa)			
	Cimento Portland Tipo CP II - Z	RCV	Agregado Miúdo	Relação Água/aglomerante ¹
Referência	1,00	---	2,05	0,55
15% RCV	0,85	0,15		
25% RCV	0,75	0,25		
Referência	1,00	---	1,50	0,45
15% RCV	0,85	0,15		
25% RCV	0,75	0,25		
Referência	1,00	---	0,94	0,35
15% RCV	0,85	0,15		
25% RCV	0,75	0,25		

¹ Aglomerante: cimento Portland + resíduo de cerâmica vermelha (RCV)

3.3.4.1 Mistura das argamassas

As argamassas foram preparadas em recipiente polimérico utilizando como misturador uma furadeira convencional na qual foi acoplada uma pá de mistura corriqueiramente utilizada em batedeiras domésticas. A adoção deste método de mistura se fez necessário em virtude da falta de infraestrutura laboratorial da instituição.

A água de mistura foi lançada completamente no recipiente polimérico e, sobre esta, foi lançado o material aglomerante (cimento + RCV), previamente homogeneizado.

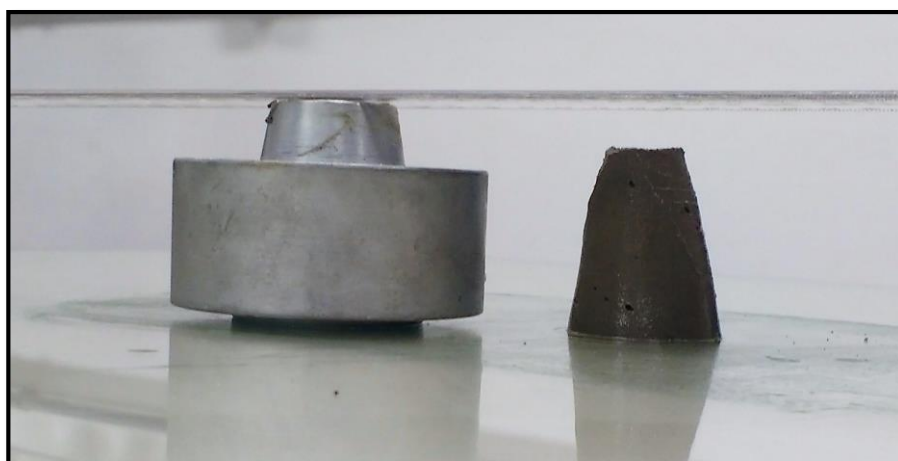
A mistura foi realizada por um período de 2 minutos. Na sequência, o agregado miúdo foi adicionado em parcelas, sendo misturado gradativamente à pasta. A mistura demandou tempo suficiente para a constatação visual da homogeneidade da argamassa, ou seja, aproximadamente 5 minutos para a realização do ciclo completo de mistura.

3.3.4.2 Ensaio no mini tronco de cone de Kantro

Após a mistura das argamassas, as mesmas ficaram em repouso por 3 minutos e, na sequência, tiveram sua consistência estimada por meio do ensaio de espalhamento no mini tronco de cone de Kantro. A rotina experimental se assemelha, guardadas as devidas proporções, à metodologia prescrita para o ensaio de abatimento no tronco de cone (*slump test*), frequentemente utilizado para avaliar a trabalhabilidade de concreto no estado estacionário.

O procedimento de ensaio consiste no preenchimento e nivelamento do molde tronco-cônico assentado sobre uma placa de vidro, ambos devidamente lubrificados, e preenchimento com a argamassa em teste. Em seguida, o mini tronco é levantado verticalmente, o que permite o abatimento e espalhamento do material cimentício. Ao término do escoamento, são medidos, ortogonalmente, dois diâmetros horizontais sobre o disco formado. A média destes diâmetros representa o espalhamento da pasta e está relacionado à sua consistência (KANTRO, 1980 *apud* Capraro *et al.*, 2016). Na Figura 11 está apresentado o ensaio realizado em uma das argamassas do presente estudo.

Figura 11 – Ensaio de espalhamento/abatimento no mini tronco de cone de Kantro.



Fonte: Própria.

3.3.4.3 Moldagem dos corpos-de-prova

As argamassas, após o ensaio de consistência no mini tronco de Kantro, foram lançadas, em quatro camadas, nos moldes cilíndricos de dimensões $\varnothing 5 \times 10$ cm. O adensamento de cada camada foi realizado pela aplicação de 30 golpes de soquete padrão, de acordo com as especificações da ABNT NBR 7215/1996. As argamassas permaneceram em repouso, nos moldes recobertos por placas de vidro, durante 24 horas, para então serem desmoldadas e submetidas à cura submersa em água saturada com cal. Os corpos-de-prova permaneceram sob cura submersa até as idades de ensaio de resistência à compressão axial e porosidade. Para cada uma das argamassas estudadas foram moldados dez corpos-de-prova, dos quais três foram ensaiados aos 7 dias, quatro aos 28 dias e três aos 56 dias. Na Figura 12 são apresentados os corpos-de-prova identificados após a desmoldagem.

Figura 12 – Corpos-de-prova de argamassa após a desmoldagem.



Fonte: Própria.

3.3.5 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado nas idades de 7; 28 e 56 dias em máquina de ensaio de compressão (prensa hidráulica) da marca EMIC, modelo PC 200C, com taxa de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s (± 490 N/s para corpos-de-prova de $\varnothing 5 \times 10$ cm).

As imperfeições das superfícies planas nos corpos-de-prova foram mitigadas pelo uso de pratos de aço que acomodam discos de neoprene de dureza *shore 70*. A disposição de um corpo-de-prova, com os pratos de aço contendo os discos de neoprene, na prensa hidráulica para o ensaio de resistência à compressão é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Corpo-de-prova disposto na prensa hidráulica para ensaio de resistência à compressão



Fonte: Própria.

3.3.6 Porosidade das argamassas

A porosidade aparente de um corpo sólido é definida como o volume de vazios contido no volume total da amostra, onde o volume total é representado pelo volume ocupado pelo sólido acrescido do volume de vazios.

A porosidade de um corpo sólido se distingue em duas parcelas. A primeira, dita porosidade fechada, dificilmente pode ser detectada, enquanto a segunda, denominada de porosidade aberta ou aparente, se caracteriza por uma rede de poros intercomunicáveis com acesso à superfície.

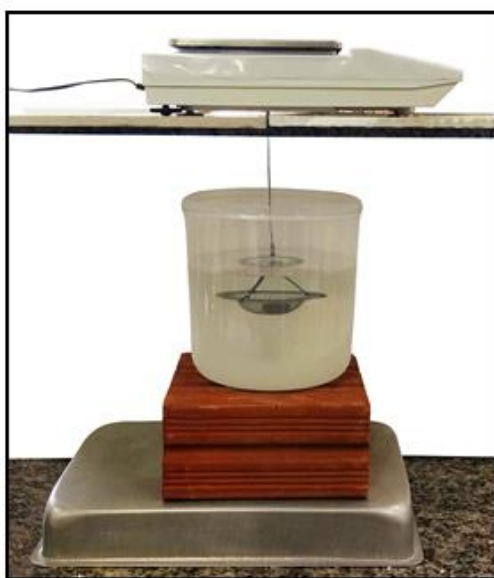
O ensaio de porosidade aparente das argamassas foi realizado em amostras extraídas dos corpos-de-prova já submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial. A amostra a ser ensaiada para a determinação da porosidade foi extraída da região central dos corpos-de-prova, já fragmentados, com o auxílio de marreta e talhadeira. A geometria da amostra obtida era bastante irregular, porém com dimensão máxima aproximada de 5,0 mm e sem a presença da superfície externa do corpo-de-prova. O cuidado com a dimensão máxima e a ausência da superfície externa teve como objetivo facilitar a secagem da amostra por liofilização (ver item 3.3.7) e evitar a influência do efeito parede propiciado pela argamassa em contato com o molde metálico.

Imediatamente após o preparo da amostra, esta era submergida em água destilada para a saturação dos poros que, apesar de estarem parcialmente preenchidos em

decorrência da cura submersa em água saturada com cal, sofrem secagem superficial. A amostra permaneceu aproximadamente 15 minutos submersa para, então, ser retirada da água e seca superficialmente. Na sequência, foi determinada a massa saturada superfície seca (M_{SSS}) e a massa submersa (M_{SUB}) em balança hidrostática. A balança eletrônica utilizada é da marca Marte, modelo AD2000, com precisão de 0,01 g.

Na Figura 14 está apresentada a adequação da balança eletrônica para determinação da massa submersa da amostra

Figura 14 – Balança hidrostática utilizada para a determinação da massa submersa das amostras.



Fonte: Própria.

Após a determinação da massa saturada superfície seca (M_{SSS}) e da massa submersa (M_{SUB}), a amostra foi acondicionada em recipiente polimérico de 50 mL, com tampa, e estocada em freezer especial a uma temperatura de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a paralisação das reações de hidratação. A permanência mínima no freezer foi de 24 horas para, então ser realizado o processo de secagem da amostra, por liofilização (ver item 3.3.7).

Ao término da liofilização, a massa seca (M_s) foi determinada na mesma balança eletrônica utilizada na determinação da massa saturada superfície seca (M_{SSS}) e da massa submersa (M_{SUB}).

A porosidade aparente das diferentes amostras de argamassa foi determinada por meio da Equação 2.

$$P = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_{SSS} - M_{SUB}} \times 100$$

Equação 2

P – Porosidade aparente (%);
M_{SSS} – Massa saturada superfície seca (g);
M_S – Massa seca (g);
M_{SUB} – Massa submersa (g).

3.3.7 Secagem das amostras para difratometria de raios-X e porosidade - liofilização

A secagem da amostra por liofilização após o congelamento tem por objetivo retirar a água livre contida nos poros da pasta endurecida, mantendo a água quimicamente combinada e parte da água adsorvida nos compostos hidratados formados. Desta forma a amostra não dispõe de água nos poros para o prosseguimento das reações desde que esteja acondicionada em ambiente com baixa umidade relativa.

A liofilização foi realizada em liofilizador da marca Terroni, modelo LS 3000, por um período de 16 horas. A condensador do equipamento opera a uma temperatura de -50 °C e a bomba de vácuo possui capacidade de atingir uma pressão de 80 μm Hg. Sob estas condições, a água congelada na estrutura porosa da pasta endurecida é sublimada, ou seja, passa do estado sólido diretamente para o estado gasoso, o que impede a ocorrência de qualquer reação da água com os materiais contidos na amostra. Esta técnica é amplamente utilizada na secagem de amostras destinadas ao estudo da microestrutura de matrizes de base cimentícia e, em decorrência da disponibilidade do equipamento na Instituição, foi utilizada para o preparo da amostra da pasta e das argamassas. A Figura 15 apresenta o liofilizador utilizado na secagem da pasta estudada.

Figura 15 – Liofilizador utilizado para a secagem da amostra de pasta de hidróxido de cálcio e RCV.



Fonte: Própria.

As amostras, após a secagem por liofilização, foram estocadas em dessecador de vidro contendo a sílica gel como agente secante. Desta forma, qualquer umidade será absorvida pela sílica gel, o que impede qualquer reação das amostras com a umidade contida no ambiente confinado do dessecador. Na Figura 16 está apresentado o dessecador com o lastro de sílica gel e as amostras previamente secas por liofilização estocadas em recipientes poliméricos de 50 mL, com tampa.

Figura 16 – Amostras liofilizadas estocadas em dessecador contendo sílica gel.



Fonte: Própria.

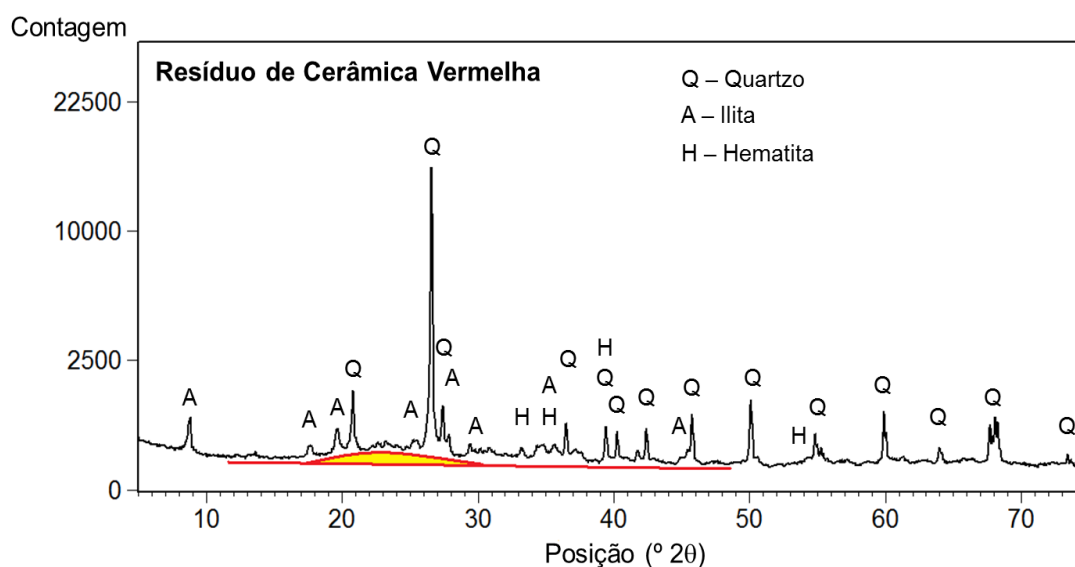
Quando da realização da difratometria de raios-X da pasta de hidróxido de cálcio e RCV, a amostra foi retirada do dessecador, pulverizada e preparada conforme consta do item 3.3.1. Já para a determinação da porosidade, as amostras secas de argamassa foram retiradas do dessecador e imediatamente pesadas na balança eletrônica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização mineralógica do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV)

A Figura 17 apresenta o difratograma de raios-X do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). A identificação das fases mineralógicas do RCV foi realizada por meio de análise comparativa com as fichas do International Center of Diffraction Data (ICDD). O RCV é constituído predominantemente por quartzo (SiO_2), Ilita ($(\text{K},\text{Al}_2)(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e Hematita (Fe_2O_3). Também foi identificado um tênue halo amorfo (região destacada em amarelo no perfil difratométrico), o que atribui potencialidade reativa com a cal para a formação de compostos hidratados.

Figura 17 – Perfil difratométrico da amostra do Resíduo de Cerâmica Vermelha.



Fonte: Própria.

4.2 Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico – Ensaio Fratini

No ensaio Fratini foi avaliado a potencialidade reativa do RCV nos teores de 15 e 25% em substituição ao cimento Portland do tipo CP II - Z. Na Tabela 5 estão apresentadas as concentrações de hidroxila e cal nas idades de 8 e 15 dias. A avaliação da

pozolanicidade requer a análise comparativa com a curva de saturação que atribui pozolanicidade ou não pozolanicidade ao aglomerante ensaiado.

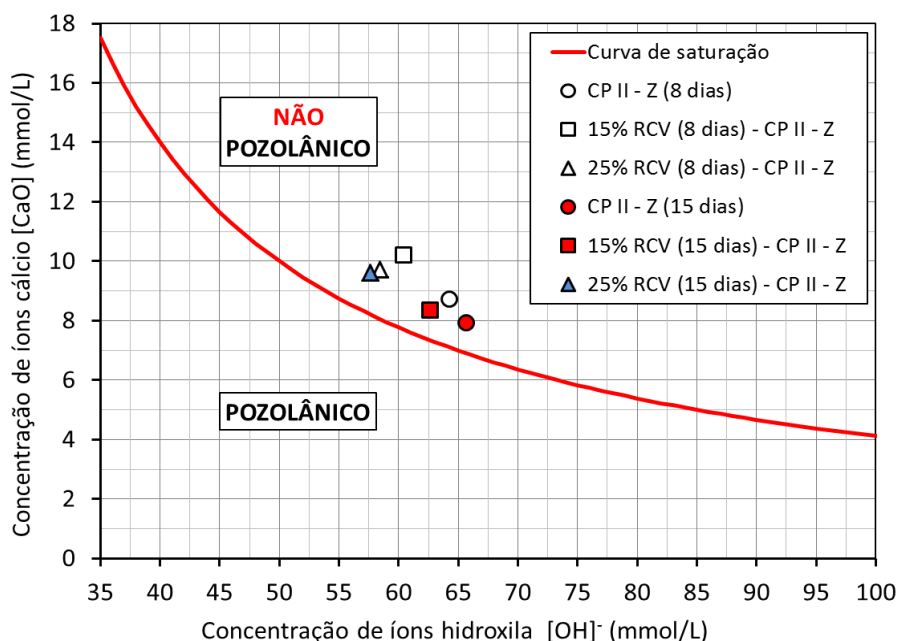
Tabela 5 - Resultado do ensaio Fratini aos 8 e as 15 dias de idade.

Aglomerantes	8 dias		Resultado	15 dias		Resultado
	Concentração (mmol/L)			Concentração (mmol/L)		
	[OH] ⁻	[CaO]		[OH] ⁻	[CaO]	
100% CP II - Z	64,2	8,73	Não pozolânico	65,60	7,93	Não pozolânico
85% CP II - Z + 15% RCV	60,4	10,21	Não pozolânico	62,60	8,37	Não pozolânico
75% CP II-Z + 25% RCV	58,40	9,72	Não pozolânico	57,60	9,62	Não pozolânico

Fonte: Própria.

A representação gráfica dos resultados no plano cartesiano que contém, no eixo das abcissas, a concentração do óxido de cálcio (CaO) e, no eixo das ordenas, a concentração do íon hidroxila (OH⁻), indica, em relação a curva de saturação, a potencialidade pozolânica dos aglomerantes estudados. Os resultados aos 8 e 15 dias, apresentados na Figura 18, indicam que o RCV, independentemente do teor utilizado, não atribui pozolanicidade aos aglomerantes. Cabe ressaltar que o cimento Portland do tipo CP II – Z, o qual pode conter adição pozolânica em teor entre 6 e 14%, não foi classificado como pozolânico.

Figura 18 – Resultado do ensaio Fratini para o cimento CP II – Z, 15% RCV e 25% RCV.



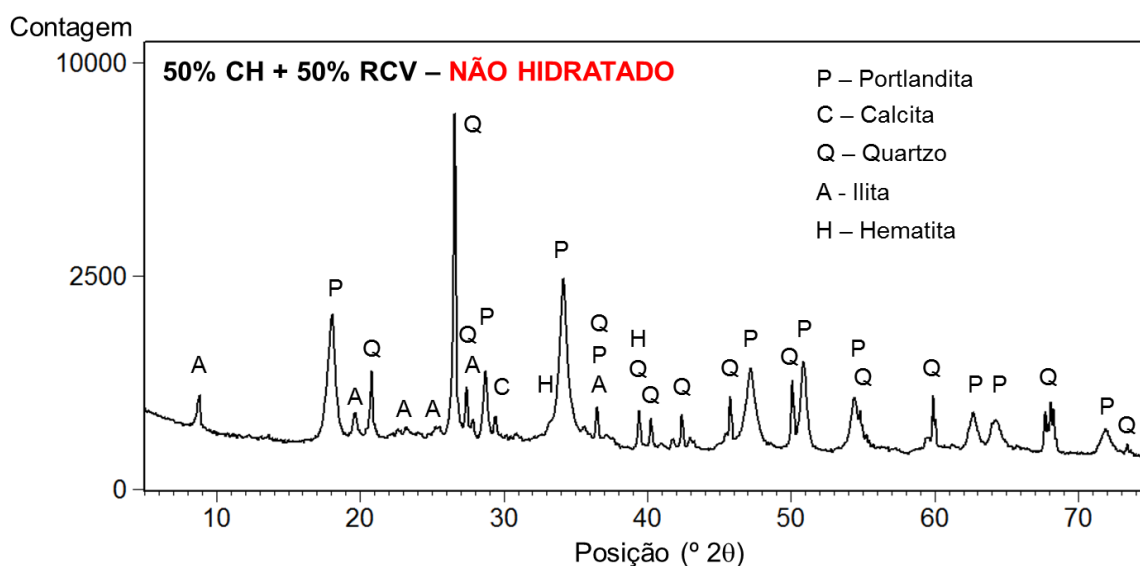
Fonte: Própria.

O RCV estudado contém 93,6% das partículas com dimensão superior a 75 µm, o que atribui baixa reatividade ao material cominuído. A grande dimensão das partículas interfere diretamente sobre a capacidade de interagir quimicamente com a cal. Os resultados de Garcia *et al.* (2014), referentes ao estudo da pozolanicidade do RCV, indicam que as partículas devem possuir dimensão inferior a 75 µm para reagir significativamente com a cal. Diante desta consideração, constatou-se que a predominância de partículas maiores que 75 µm propicia baixo consumo de cal.

4.3 Produtos hidratados decorrentes da reação do RCV com o hidróxido de cálcio

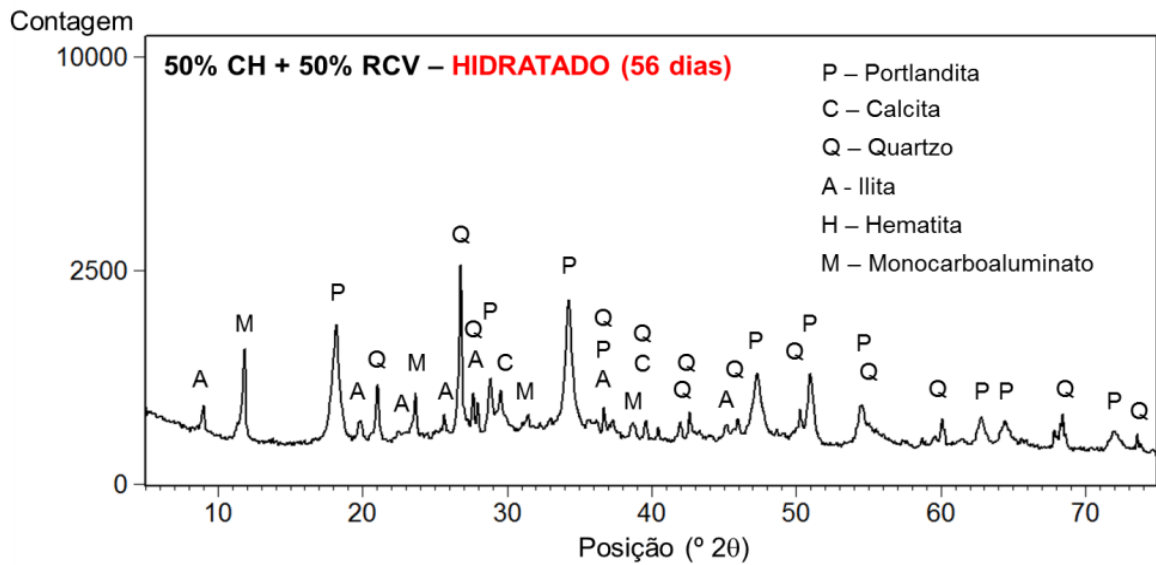
O perfil difratométrico da mistura em pó composta por 50% RCV + 50% CH, apresentado na Figura 19, indica a presença de portlandita (Ca(OH)_2) e calcita (CaCO_3), oriundos do reagente analítico, e quartzo (SiO_2), illita ($(\text{K}.\text{Al}_2.\text{(Si}_3.\text{Al)}_0.\text{(OH)}_2)$) e hematita (Fe_2O_3), provenientes do RCV. Esta composição, ao ser misturada na relação água/sólidos = 0,55 e mantida em condições laboratoriais para a reação ao longo de 56 dias, resultou, *a priori*, na formação de monocarboaluminato de cálcio hidratado ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaCO}_3.11\text{H}_2\text{O}$). Na Figura 20 é apresentado o perfil difratométrico da pasta hidratada aos 56 dias de idade.

Figura 19 - Perfil difratométrico da amostra em pó constituída por 50% RCV + 50% CH.



Fonte: Própria.

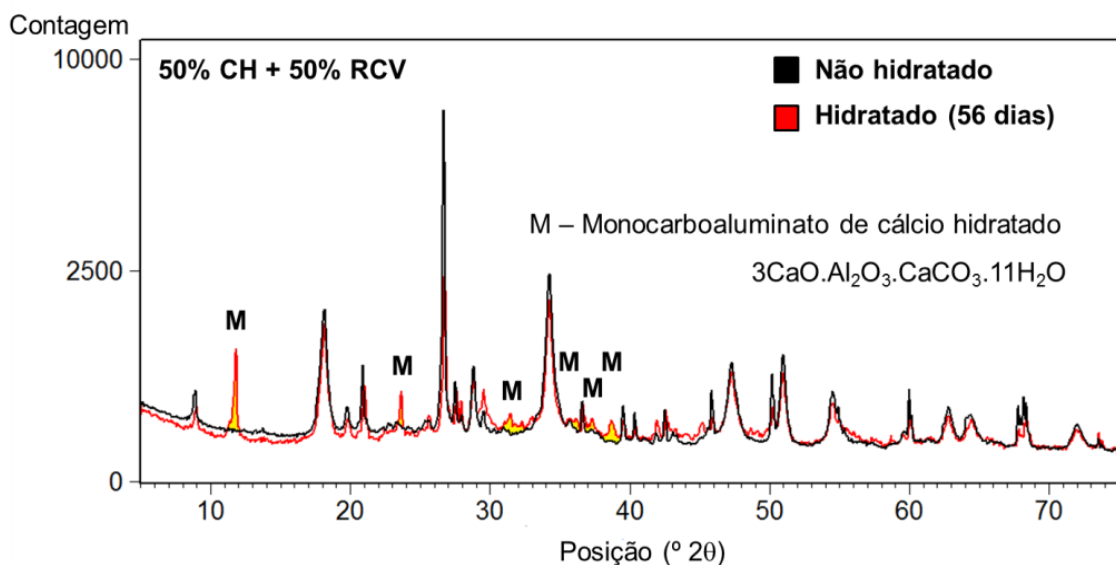
Figura 20 - Perfil difratométrico da amostra constituída por 50% RCV + 50% CH, após hidratação por 56 dias.



Fonte: Própria.

A sobreposição dos perfis difratométricos da amostra previamente à interação com a água e após 56 dias de hidratação é apresentada na Figura 21.

Figura 21 -Perfil difratométrico comparativo das amostras anidra e hidratada de 50% do RCV + 50% CH.



Fonte: Própria.

As alterações no perfil difratométrico da amostra hidratada em comparação à amostra não hidratada indica a formação de monocarboaluminato de cálcio hidratado. Os

principais picos característicos deste produto de hidratação foram indicados na Figura 20. Há que se destacar que houve redução do principal pico característico de portlandita, localizado em $34,2^\circ 2\theta$, o que indica consumo para a formação de compostos hidratados.

Na região de $29,0^\circ 2\theta$ houve alteração do perfil difratométrico, com a formação de pico característico relacionado à presença de C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

Em suma, a reação do RCV com o hidróxido de cálcio resulta, predominantemente, em monocarboaluminato de cálcio hidratado, além de indícios da formação de C-S-H.

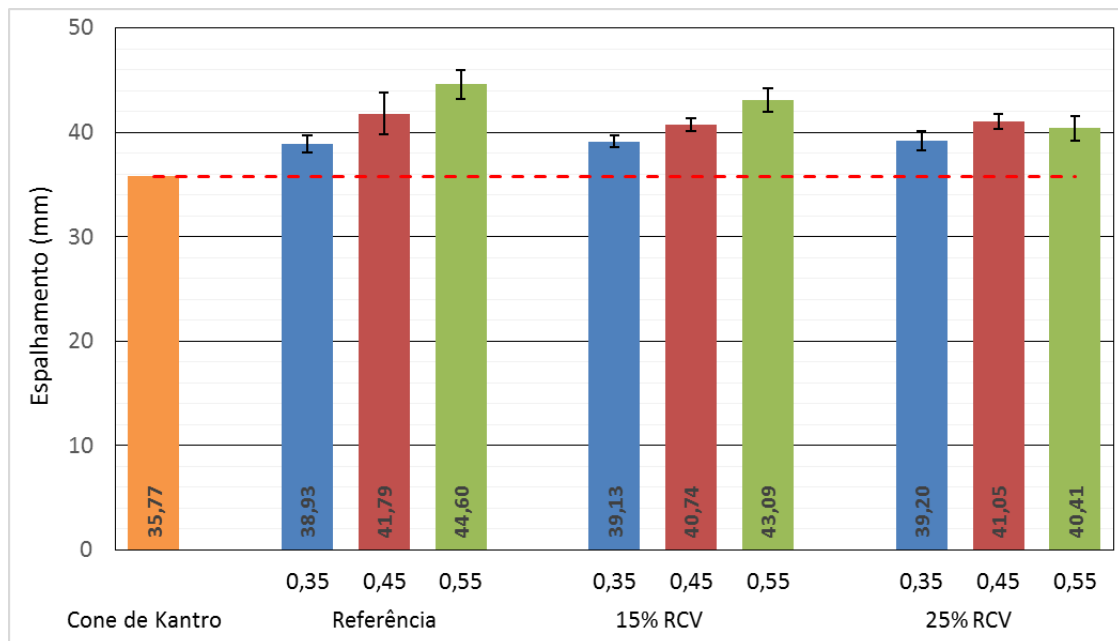
4.4 Ensaio de mini tronco de Kantro

O ensaio de mini tronco de cone de Kantro foi utilizado para avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por RCV no espalhamento das argamassas misturadas em diferentes relações água/aglomerantes e com relação água/materiais secos constante. De acordo com a Lei de Lyse, mantida constante a relação água/materiais secos, a alteração na relação água/aglomerantes não impactará significativamente na consistência das argamassas. Tal conceito é válido para misturas realizadas com os mesmos materiais. No presente estudo, houve variação na composição dos materiais aglomerantes. Assim sendo, há que se avaliar a influência do RCV em diferentes teores. Esta avaliação pode ser realizada por diferentes métodos, porém a opção pelo o ensaio no mini cone de Kantro decorre da sua disponibilidade na instituição.

O diâmetro da base do mini tronco de Kantro, utilizado como referência, é de 37,55 mm. Nas argamassas, após o ensaio de espalhamento, foi realizada duas medidas ortogonais do diâmetro final. O resultado do ensaio representa a média dos diâmetros. Na Figura 22 estão apresentados os resultados de espalhamento das diferentes argamassas estudadas. De maneira geral é possível observar que o aumento da relação água/aglomerantes tende a aumentar o espalhamento, apesar deste aumento ser pequeno. A substituição parcial do cimento por RCV não alterou significativamente a consistência das argamassas, apesar da verificação de uma tendência de redução do espalhamento para teores crescentes de RCV na composição do material aglomerante. Cabe destacar que este método de análise do comportamento da argamassa no estado fresco apresenta limitações. Desta forma, ensaios mais criteriosos seriam necessários para avaliar a real influência da utilização do RCV na composição do material aglomerante e seus efeitos na consistência das argamassas. O maior espalhamento foi de 44,60 mm e

o menor de 38,93 mm, ambos observados na argamassa de referência, para as relações água/aglomerantes igual a 0,55 e 0,35 respectivamente.

Figura 22 – Espalhamento das pastas.



Fonte: Própria.

4.5 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão referente a cada idade de ensaio foi determinada a partir da média dos ensaios de, no mínimo, três corpos-de-prova. A análise das resistências à compressão demandou, em alguns casos, a eliminação de resultados para que o coeficiente de variação máximo não excedesse 10% e assim garantir uma baixa dispersão dos dados. A Tabela 6 apresenta a resistência a compressão média, em MPa, para as diferentes argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias.

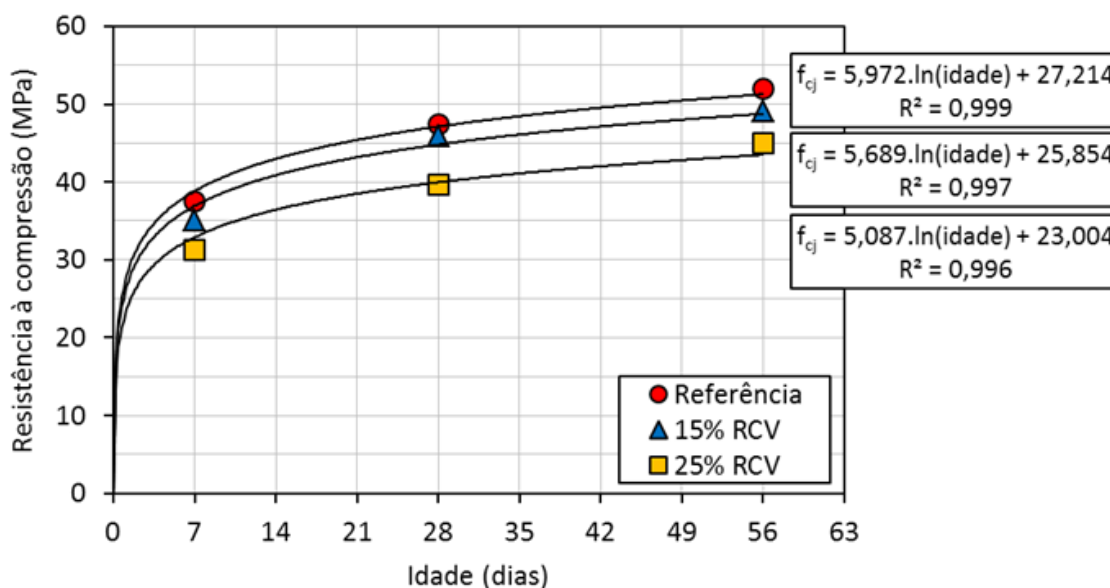
Tabela 6 - Resistência a compressão axial média, em MPa, para as diferentes argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Argamassa	Relação água/agl.	7 dias		28 dias		56 dias	
		Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
Referência	0,55	18,5	1,0	25,3	0,8	26,6	0,9
15 % RCV		15,9	0,5	21,1	0,4	24,1	1,3
25 % RCV		12,1	0,2	18,5	0,3	21,3	1,1
Referência	0,45	25,9	1,3	33,8	2,7	36,1	2,9
15 % RCV		23,1	2,5	31,2	3,0	33,3	1,2
25 % RCV		19,5	1,9	27,8	1,3	32,3	1,2
Referência	0,35	37,5	1,7	47,4	1,1	51,9	1,7
15 % RCV		35,1	3,3	45,9	0,8	49,1	0,4
25 % RCV		31,2	0,3	39,7	1,3	45,0	2,0

Fonte: Própria.

Na Figura 23 é apresentada a evolução da resistência a compressão das argamassas misturadas na relação água aglomerantes igual a 0,35 e com diferentes composições do material aglomerante.

Figura 23 – Evolução da resistência à compressão axial das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,35.



Fonte: Própria.

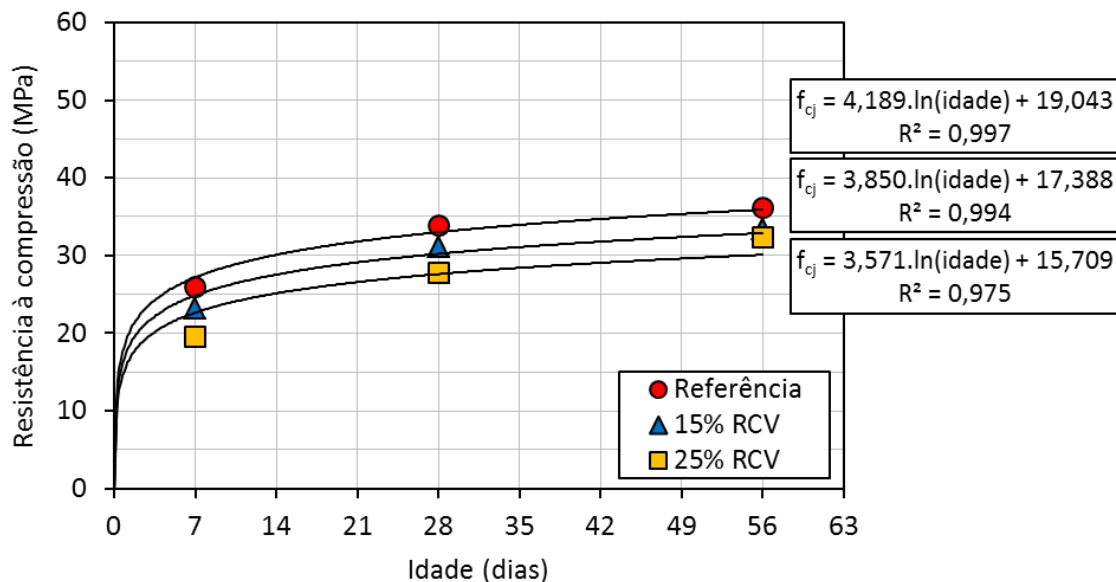
A argamassa de referência, para a relação água/aglomerantes 0,35, apresentou resistência à compressão de 37,5; 47,4 e 51,9 MPa para as idades de 7, 28 e 56 dias, respectivamente.

A argamassa contendo 15% RCV, para a mesma relação água/aglomerante, apresentou resistência à compressão de 35,1; 45,9 e 49,1 MPa para as mesmas idades. De fato, a substituição parcial do cimento Portland por 15% de RCV causou redução média na resistência à compressão de 5,0% em relação aos valores observados na argamassa de referência.

A substituição parcial do cimento por 25% de RCV, para a relação água/aglomerante 0,35, resultou em valores de resistência à compressão de 31,2; 39,7 e 45,0 MPa para as idades de 7, 28 e 56 dias, respectivamente. O decréscimo médio em relação à argamassa de referência foi de 15%.

A evolução da resistência à compressão das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes 0,45 e com diferentes composições do material aglomerante é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Evolução da resistência à compressão das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,45.



Fonte: Própria.

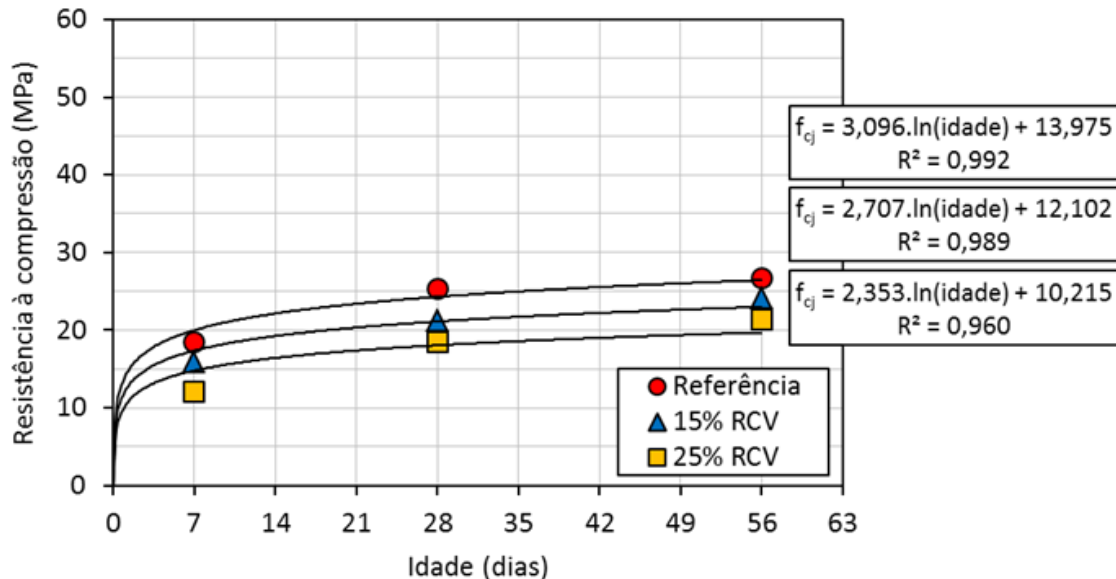
A tendência observada para as argamassas moldadas na relação água/aglomerantes 0,35 se repetiu quando do aumento desta relação para 0,45, ou seja,

a substituição parcial do cimento por RCV causou decréscimo na resistência à compressão. Este decréscimo se acentuou com o aumento do teor de RCV na composição do cimento Portland.

A argamassa de referência apresentou resistência à compressão de 25,9; 33,8 e 36,1 MPa para as idades de 7, 28 e 56 dias, respectivamente. Já a argamassa contendo 15% RCV apresentou 23,1; 31,2 e 33,3 MPa para as mesmas idades, o que resulta em um decréscimo médio na resistência à compressão de 9%. Quando da substituição do cimento Portland por RCV no teor de 25%, os valores de resistência à compressão foram de 19,5; 27,8 e 32,3 MPa para 7, 28 e 56 dias, respectivamente. O decréscimo médio na resistência à compressão foi de 18%.

Na Figura 25 é apresentada a evolução da resistência à compressão das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes 0,55 e com diferentes composições do material aglomerante.

Figura 25 - Evolução da resistência à compressão das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,55.



Fonte: Própria.

De fato, a substituição parcial do cimento Portland por RCV causou, novamente, redução da resistência à compressão das argamassas, de forma que o aumento no teor de RCV impactou de forma mais significativa nesta redução.

A argamassa de referência apresentou valores de resistência à compressão de 18,5; 25,3; 26,6 MPa nas idades de 7, 28 e 56 dias, respectivamente.

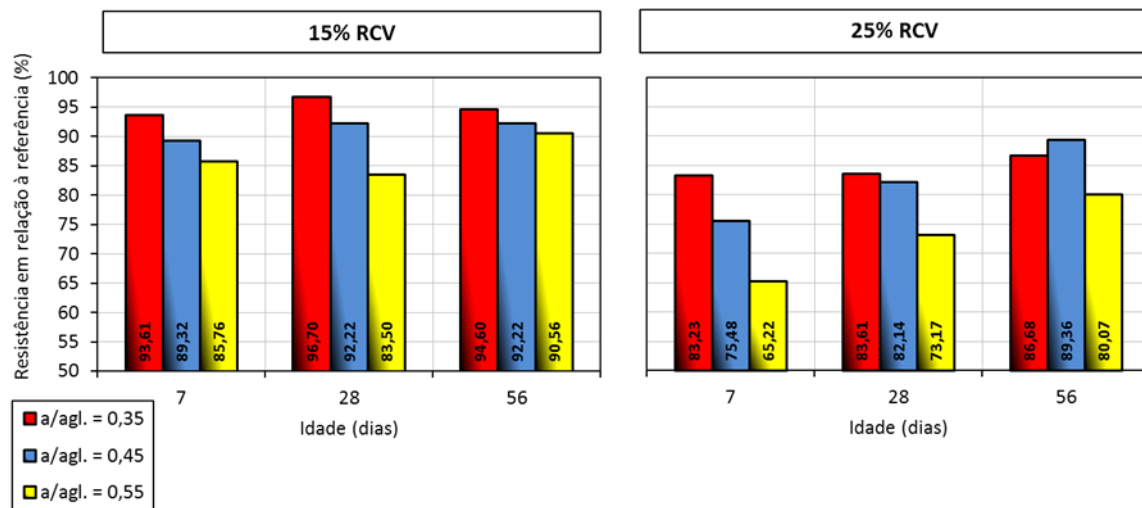
Na argamassa contendo 15% RCV, os valores de resistência à compressão foram de 15,9; 21,1 e 24,1 MPa para as mesmas idades. Em média, a redução da resistência à compressão em relação à argamassa de referência foi de 14%.

A argamassa contendo 25% de RCV apresentou resistência à compressão de 12,1; 18,5 e 21,3 MPa para as idades de 7, 28 e 56 dias, respectivamente. O decréscimo médio na resistência à compressão em comparação à argamassa de referência foi de 28%.

A análise referente à substituição parcial do cimento Portland por RCV indica que há decréscimo na resistência à compressão em relação à argamassa de referência. Este decréscimo é potencializado para teores crescentes de RCV na composição do cimento Portland. Também há que se enfatizar que a variação na relação água/aglomerante impacta na redução da resistência à compressão das argamassas contendo RCV. O aumento da relação água/aglomerante propicia, em média, aumento da redução da resistência à compressão das argamassas. Diante destas diretrizes, há que se pormenorizar a influência da relação água/aglomerante sobre a resistência à compressão das argamassas que contém RCV na composição do cimento Portland. A Figura 26 apresenta a resistência à compressão relativa à referência das argamassas contendo diferentes teores de RCV na composição do cimento Portland. Os valores percentuais apresentados diferem em função da relação água/aglomerante, de tal forma que é possível identificar comportamento distintos quando há aumento desta relação. Para o teor de 15% de RCV em substituição com cimento, é possível observar que a redução na resistência à compressão em relação à argamassa de referência se mantém praticamente constante ao longo do tempo, porém em diferentes intensidades, quando a relação água/aglomerante é inferior a 0,45. Na relação água/aglomerante 0,35 a redução variou entre $5,0 \pm 1,6\%$. Para a relação água/aglomerante 0,45, a variação foi de $8,7 \pm 1,7\%$. A argamassa moldada na relação água/aglomerante 0,55 apresentou diferença de comportamento a partir de 28 dias, de tal forma que até esta idade a redução na resistência à compressão foi de $15,4 \pm 1,6\%$, ou seja, similar ao teor de substituição parcial de cimento Portland por RCV. Já aos 56 dias, a redução da resistência em relação à argamassa de referência passou a ser de 9,4%, valor próximo ao observado na argamassa moldada na relação água/aglomerante 0,45. Isto é um indício de que a utilização de RCV

na composição do cimento Portland em argamassas moldadas em relação água/aglomerante superior a 0,45 requer a análise dos efeitos sobre a resistência à compressão em idades superiores a 56 dias.

Figura 26 – Resistência à compressão relativa à referência das argamassas contendo diferentes teores de RCV.



Fonte: Própria.

A substituição parcial do cimento Portland por RCV, no teor de 25%, para a execução de argamassa com relação água/aglomerante 0,35 resultou em decréscimo praticamente constante na resistência à compressão em relação à argamassa de referência ao longo do tempo. Tal redução variou entre $15,5 \pm 1,9\%$, o que implica em decréscimos inferiores ao teor de RCV utilizado na composição do cimento Portland.

Para as relações água/aglomerante 0,45 e 0,55, o comportamento das argamassas contendo RCV em relação à referência se alterou significativamente ao longo do tempo, de tal forma que houve incremento percentual progressivo da resistência à compressão em relação à argamassa de referência. Na relação água/aglomerante 0,45, aos 7 dias de idade, a redução na resistência foi de 24,5%, valor similar ao teor de RCV utilizado na composição do cimento Portland. Aos 28 dias esta redução passou a ser de 17,9% e, aos 56 dias, 10,6%. A argamassa misturada na relação água/aglomerante 0,55 apresentou, aos 7 dias, redução na resistência à compressão de 34,8%, valor superior ao teor de RCV utilizado no preparo do aglomerante. Já aos 28 dias, esta redução foi de 26,8%, ou seja, similar ao teor de RCV e, por fim, aos 56 dias, a redução foi de 19,9%.

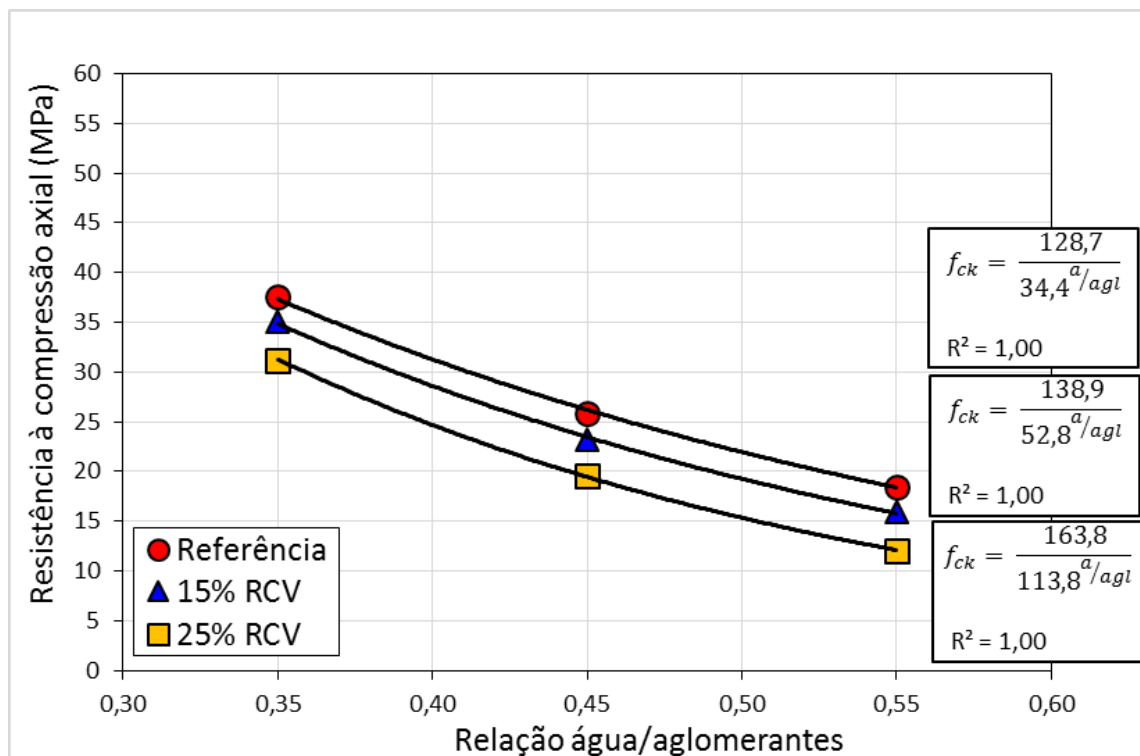
Portanto, na condição mais desfavorável, ou seja, na relação água/aglomerante 0,55, as argamassas contendo RCV apresentaram, aos 56 dias, redução de 10% na

resistência à compressão em relação à referência quando o teor de RCV foi de 15% e, para o teor de 25% de RCV, a redução foi de 20%. Isto significa que a utilização de RCV na composição do cimento Portland propicia redução na resistência à compressão das argamassas em percentual inferior ao teor de RCV utilizado, desde que avaliado em idades a partir de 56 dias.

A dependência da resistência à compressão para com a relação água/aglomerante constitui a Lei de Abrams, a qual se aplica em concretos e argamassas plásticos executados com os mesmos materiais. Caso ocorra alteração dos materiais, haverá alteração da Lei de Abrams que relaciona a resistência à compressão à relação água/aglomerante. Assim sendo, é de interesse tecnológico estabelecer as curvas que representam as Leis de Abrams das argamassas estudadas, a fim de permitir estabelecer a relação água/aglomerante para atingir determinada resistência à compressão pré-estabelecida.

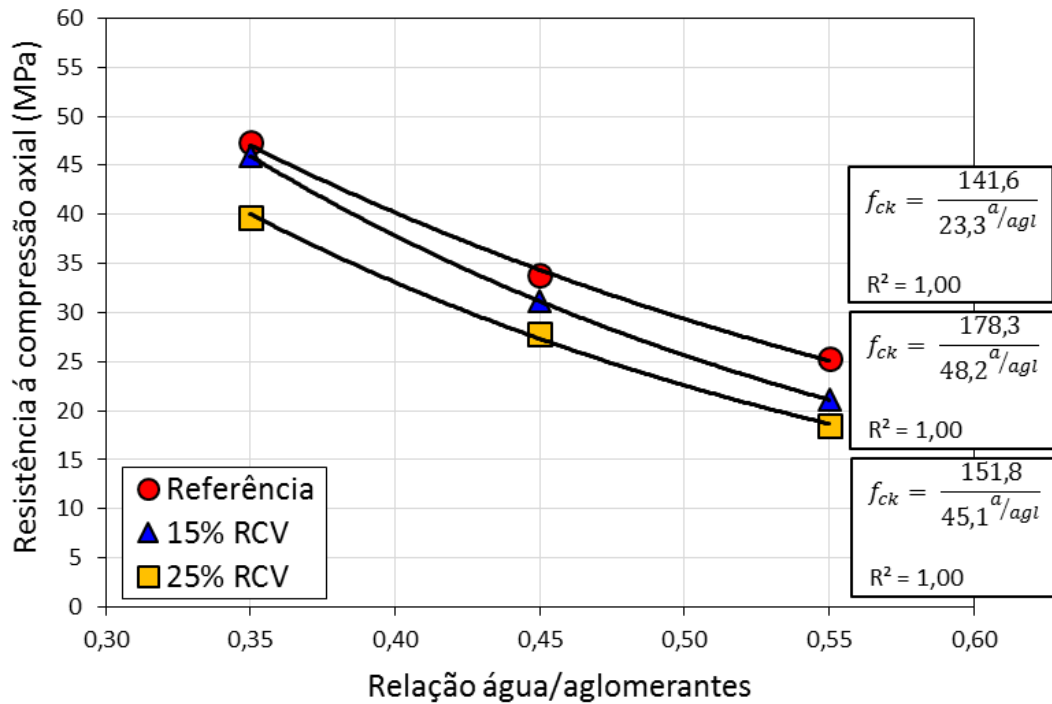
Nas Figuras 27, 28 e 29 são apresentadas, respectivamente, as curvas de comportamento das diferentes argamassas estudadas, bem como as respectivas Leis de Abrams, para as idades de 7, 28 e 56 dias.

Figura 27 – Curvas de Abrams das diferentes argamassas na idade de 7 dias.



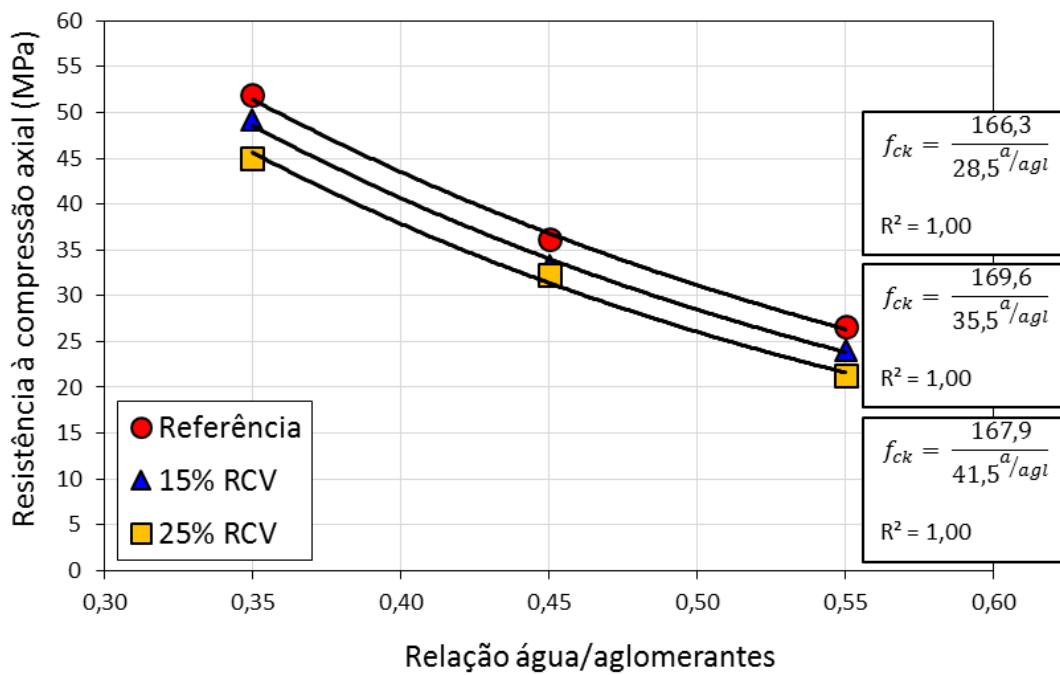
Fonte: Própria.

Figura 28 – Curvas de Abrams das diferentes argamassas na idade de 28 dias.



Fonte: Própria.

Figura 29 – Curvas de Abrams das diferentes argamassas na idade de 56 dias.



Fonte: Própria.

As curvas de Abrams apresentadas nas Figuras 27, 28 e 29 apresentaram coeficiente de determinação (R^2) unitário, o que significa que o modelo matemático teórico representa adequadamente o comportamento experimental relacionado à resistência à compressão.

A partir das curvas apresentadas nas Figuras 26, 27 e 28 fica evidente que, para atingir determinada resistência à compressão em qualquer uma das idades estudadas, há que se reduzir a relação água/aglomerante das argamassas contendo RCV em relação à argamassa de referência. Esta redução deve ser mais acentuada para teores crescentes de RCV em substituição parcial ao cimento Portland. Por exemplo, para uma resistência à compressão de 35 MPa aos 56 dias, a argamassa de referência deve ser executada com relação água/aglomerante igual a 0,47. A argamassa contendo 15% de RCV, requer uma relação água/aglomerante de 0,44, enquanto a argamassa contendo 25% de RCV demanda uma relação água/aglomerante de 0,42.

A redução da relação água/aglomerante, implica num aumento da quantidade de aglomerante no sistema, no entanto parte do aglomerante é constituído por RCV. Para o exemplo da argamassa de 35 MPa aos 56 dias, para a argamassa de referência, o consumo de cimento é igual 701 kg/m^3 . Para a argamassa 15% RCV, o consumo é de 754 kg/m^3 , porém 15% do aglomerante é composto por RCV, assim o sistema cimentício é formado por 641 kg/m^3 de cimento + 113 kg/m^3 de RCV. Na argamassa com 25% RCV, a demanda é 762 kg/m^3 de aglomerante, sendo o cimento representado por 572 kg/m^3 e o RCV por 190 kg/m^3 . Assim, a viabilidade econômica do uso do RCV na composição do cimento Portland está condicionada a custos de produção do RCV inferior aos custos decorrentes da redução do consumo de cimento Portland em relação à argamassa de referência.

4.6 Porosidade das argamassas

A porosidade das argamassas, é dependente da relação água/aglomerante, grau de hidratação e do adensamento aplicado quando da moldagem. Previamente à execução das argamassas é possível estimar, teoricamente, a porosidade inicial dos sistemas. Esta estimativa considera que o volume de água utilizado na mistura em relação ao volume total do materiais utilizados na execução da argamassa constitui o volume de vazios, ou seja, a porosidade inicial teórica. A progressiva redução da porosidade decorre das

reações químicas de hidratação do cimento Portland ao longo do tempo. A Tabela 7 apresenta a porosidade média, em percentual, para as diferentes argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Tabela 7 - Porosidade percentual média das argamassas nas idades de 7, 28 e 56 dias de idade.

Argamassa	Relação a/agl.	Porosidade inicial teórica (%)	7 dias		28 dias		56 dias	
			P ¹ . (%)	Desvio Padrão (%)	P. (%)	Desvio Padrão (%)	P. (%)	Desvio Padrão (%)
Referência	0,35	33,3	19,1	1,9	16,4	0,7	15,1	1,6
	0,45	32,9	22,4	0,7	18,8	1,7	18,4	1,8
	0,55	32,6	24,4	0,8	21,8	1,5	19,6	1,1
15% RCV	0,35	33,0	19,8	1,4	18,0	1,7	17,3	0,4
	0,45	32,7	22,6	1,5	19,4	1,1	19,8	1,6
	0,55	32,4	25,1	2,5	24,1	1,5	23,4	1,8
25% RCV	0,35	32,9	20,7	0,7	18,1	1,8	17,5	0,5
	0,45	32,5	22,1	1,4	19,9	1,5	19,3	0,6
	0,55	32,3	24,7	2,4	24,1	1,7	22,6	1,3

¹ P: porosidade.

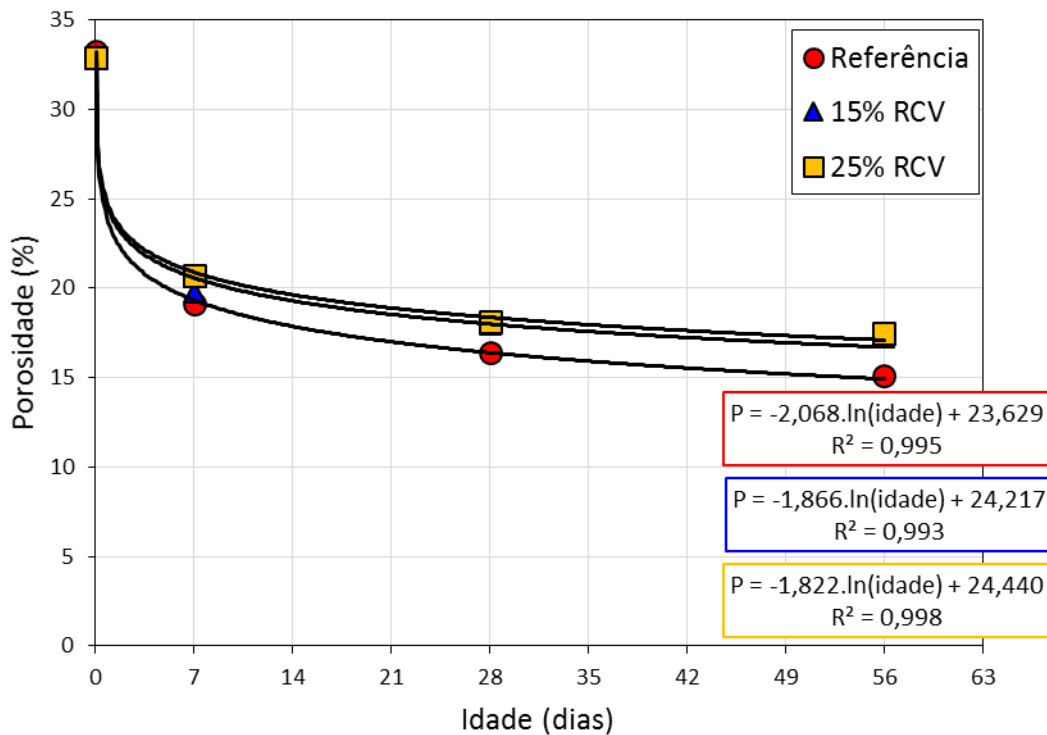
A evolução da porosidade das argamassas ao longo do tempo, para cada uma das relações água/aglomerantes estudadas, é apresentada nas Figuras 30, 31 e 32.

Na Figura 30 estão apresentadas as curvas de porosidade das argamassas executadas na relação água/aglomerante 0,35. A argamassa de referência possui porosidade inicial teórica de 33,3% e, aos 56 dias, a porosidade passou a ser de 15,1%. O aumento da concentração de sólidos na argamassa, ou seja, a redução do volume de vazios, decorre da hidratação do cimento Portland, o qual incorpora parte da água de mistura para a formação dos compostos hidratados. A redução da porosidade ao longo de 56 dias foi de 18,2% (33,3% - 15,1%).

A argamassa contendo 15% de RCV, de porosidade inicial teórica igual a 33,0%, apresentou, aos 56 dias, porosidade de 17,3%. A redução da porosidade foi de 15,7% (33,0% - 17,3%). De fato, a substituição parcial do cimento Portland por 15% de RCV propiciou aumento da porosidade da argamassa ao longo do tempo, de tal forma que aos 56 dias a porosidade foi aumentada em 2,2%. O aumento no volume de vazios impactou na resistência à compressão, causando decréscimo em comparação à argamassa de referência.

A porosidade inicial teórica da argamassa contendo 25% de RCV é de 32,9% que, depois de 56 dias de hidratação, diminuiu para 17,5%. Neste caso, a redução da porosidade foi de 15,4% (32,9% - 17,5%), valor similar ao observado para o teor de 15%. Apesar da porosidade das argamassas contendo diferentes teores de RCV ser similar aos 56 dias, a resistência à compressão foi maior quando da utilização de menor teor de RCV. Em relação à argamassa de referência, a porosidade foi incrementada em 2,4% aos 56 dias.

Figura 30 - Comportamento da porosidade em relação ao tempo, para as diferentes argamassas na relação água/aglomerantes = 0,35.

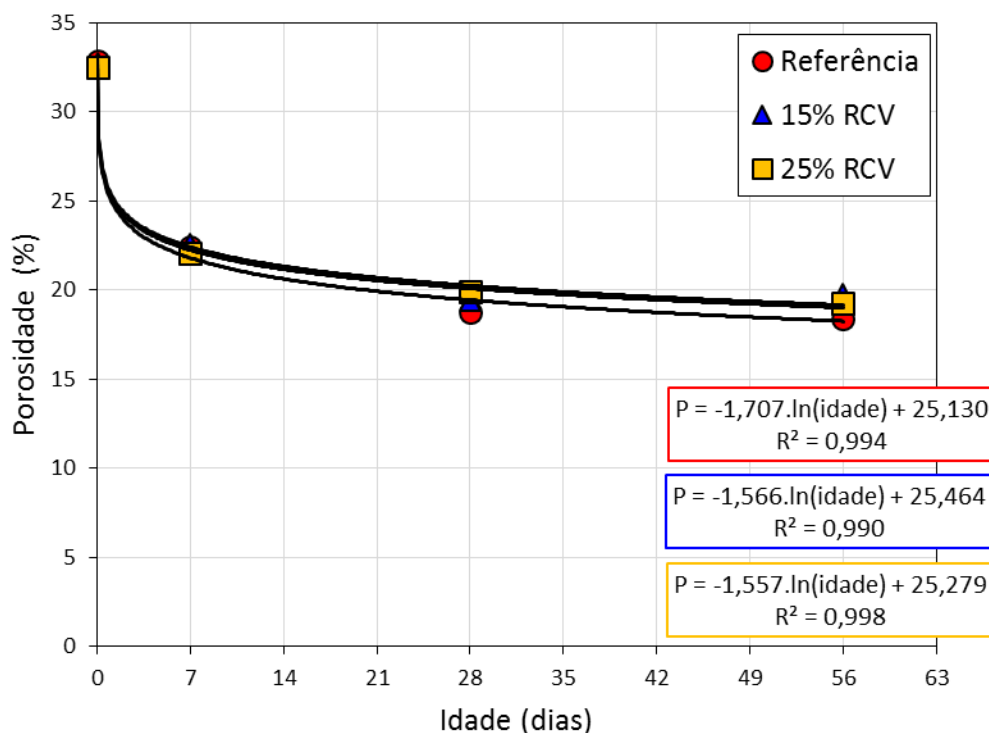


Fonte: Própria.

As curvas de evolução de porosidade das argamassas executadas na relação água/aglomerante 0,45 são apresentadas na Figura 31. A argamassa de referência apresentou menor porosidade ao longo do tempo em comparação às argamassas contendo RCV, independentemente do teor. As argamassas contendo RCV nos teores de 15 e 25% apresentaram porosidade similar durante o período estudado, apesar da resistência à compressão ter sido maior naquela com menor teor de RCV. O incremento

na porosidade aos 56 dias, em relação à argamassa de referência, foi de 1,5% e 1,0% para 15% e 25% de RCV, respectivamente.

Figura 31 - Comportamento da porosidade em relação ao tempo, para as diferentes argamassas na relação água/aglomerantes = 0,45.

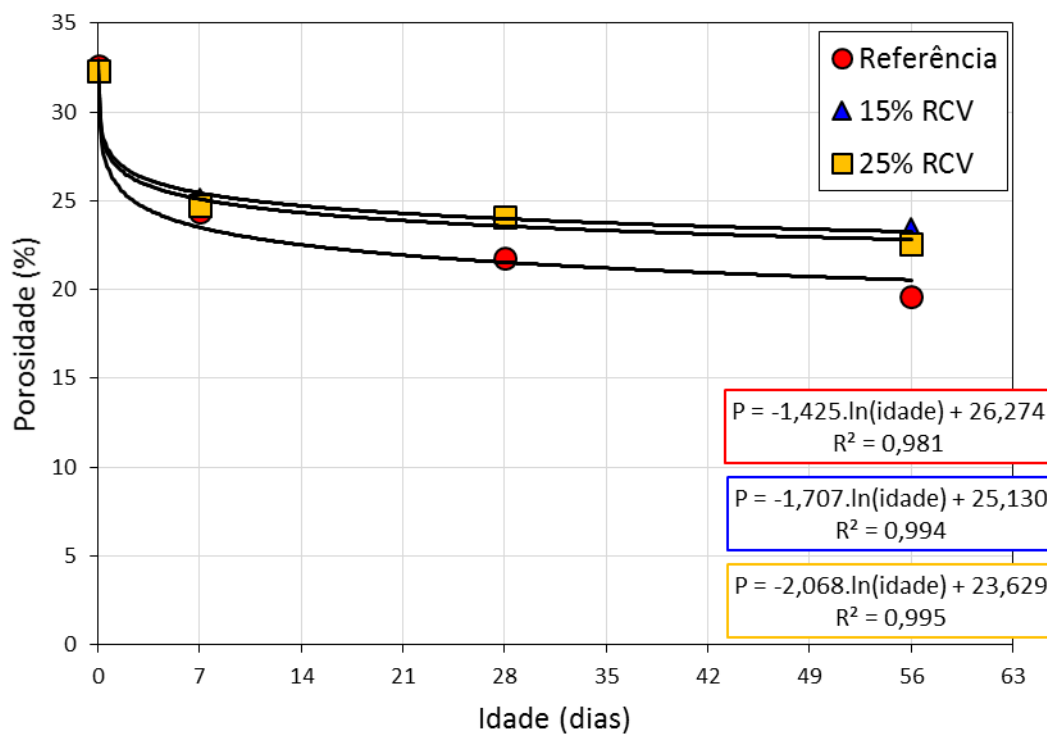


Fonte: Própria.

As argamassas moldadas na relação água/aglomerantes 0,55 têm as curvas de evolução da porosidade apresentadas na Figura 32. O comportamento observado nas demais relações água/aglomerante (0,35 e 0,45) foi recorrente, ou seja, a substituição parcial do cimento Portland por RCV, em diferentes teores, causou aumento da porosidade das argamassas.

A referência, de porosidade inicial teórica igual a 32,6%, apresentou um volume de vazios de 19,6% aos 56 dias, o que representa uma redução de 13,0% (32,6% - 19,6%). A argamassa contendo 15% de RCV, com porosidade inicial teórica de 32,4%, atingiu 23,4% de porosidade aos 56 dias, uma redução de 9,0% (32,4% - 23,4%). Já a argamassa com 25% de RCV em substituição ao cimento Portland, teve a porosidade inicial teórica de 32,3% reduzida para 22,6% aos 56 dias, uma redução de 9,7% (32,3% - 22,6%).

Figura 32 – Comportamento da porosidade em relação ao tempo, para as diferentes argamassas na relação água/aglomerantes = 0,55.



Fonte: Própria.

De maneira geral, percebe-se que a utilização de RCV na composição do cimento Portland propiciou aumento da porosidade das argamassas, o que indica que o volume de vazios depende, principalmente, do teor de cimento contido no sistema. A redução do teor de cimento implica em aumento de porosidade das argamassas.

4.7 Relação resistência à compressão X porosidade

Metha e Monteiro (1994), propõem um modelo matemático que relaciona a resistência a compressão com a porosidade, tal modelo segue um comportamento exponencial, representado pela Equação 3.

$$S = S_0 e^{-kp} \tag{Equação 3}$$

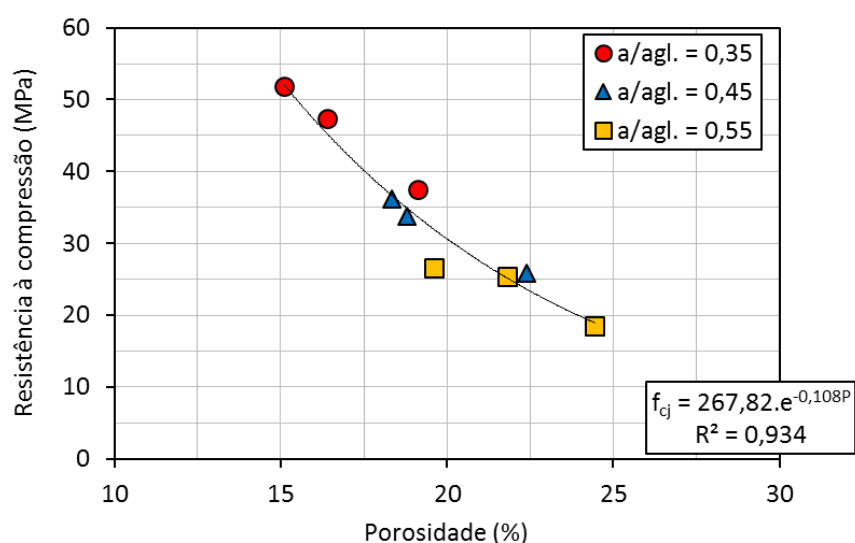
- S – Resistência (MPa);
- S_0 – Resistência com porosidade zero (MPa);
- p – Porosidade (%);
- k – Constante.

Na aplicação desse modelo sob os resultados experimentais obtidos nesse

trabalho, se adequam ao modelo proposto pelos autores.

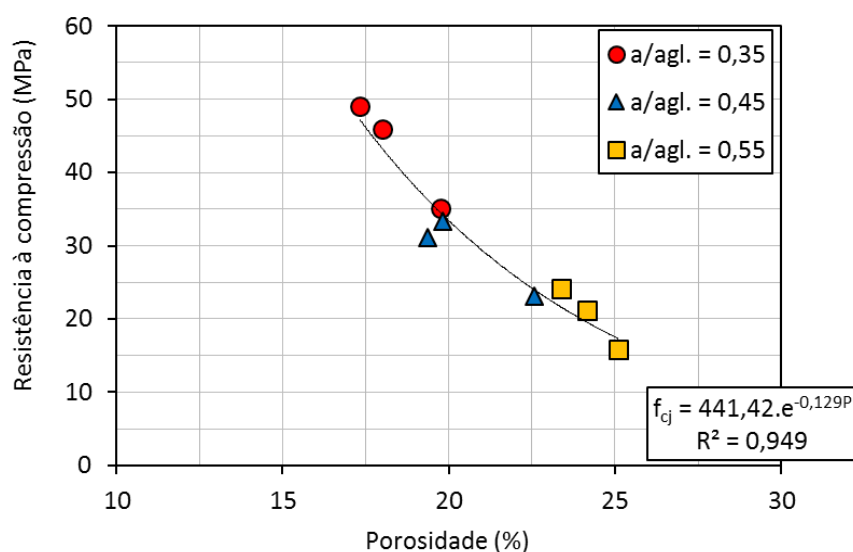
A confiabilidade dos dados se observa a partir do coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,92 para todo os resultados, o que comprova que os dados experimentais se ajustam ao modelo matemático teórico. As Figura 33, 34 e 35 apresentam para a argamassas de referência, 15% RCV e 25% RCV as coordenadas representadas por resistência a compressão e porosidade para as diferentes relações água/aglomerantes estudadas.

Figura 33 - Relação resistência X porosidade, para a argamassa de referência.



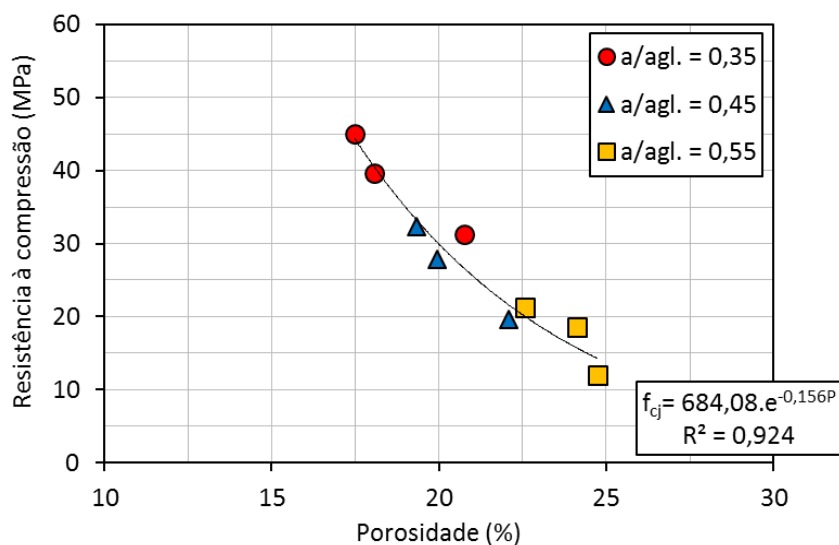
Fonte: Própria.

Figura 34 - Relação resistência X porosidade, para a argamassa 15% RCV.



Fonte: Própria.

Figura 35 – Relação resistência X porosidade, para a argamassa 25% RCV.



Fonte: Própria.

A partir das curvas apresentadas nas Figuras 33, 34 e 35, pode-se observar que sistemas cimentícios distintos e de mesma porosidade podem apresentar resistência à compressão distintas. Este comportamento pode ser observado quando da análise dos diferentes sistemas cimentícios estudados para a porosidade de 17,5%. De fato, os sistemas contendo RCV, em diferentes teores, tendem a apresentar maior resistência à compressão em comparação à argamassa de referência. Portanto, a resistência à compressão depende, além da porosidade, da distribuição do diâmetro dos poros, o que não foi analisado no presente estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi analisado os efeitos da substituição parcial de cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha cominuído, nos teores de 15 e 25% na execução de argamassas. Dentro do escopo desse trabalho, seguem as conclusões das análises realizadas nos resultados obtidos e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

No ensaio de caracterização do resíduo de cerâmica vermelha, por meio da difratometria de raios X, foi identificado um tênue halo amorfo, que atribui reatividade com a cal, o que justifica a formação do monocarboaluminato de cálcio hidratado ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$) e picos de C-S-H, verificados no perfil difratométrico da pasta composta por RCV + hidróxido de cálcio.

O ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico – Ensaio Fratini realizado aos 8 e aos 15 dias, indicou que o RCV, não atribuiu pozolanicidade aos aglomerantes, independentemente do teor utilizado.

Analisando os resultados do ensaio de mini troco de cone de Kantro, percebe-se que a substituição parcial, de cimento Portland por RCV não alterou significativamente a consistência das argamassas, apesar de haver uma tendência a redução espalhamento das argamassas para teores crescentes de RCV.

No ensaio de resistência à compressão axial, foi possível observar que há um decréscimo na resistência potencializado para teores crescentes de RCV na composição do cimento Portland, nas diferentes relações água/aglomerantes. Na relação água/aglomerante = 0,35, para a argamassa 15% RCV, observou-se uma redução média na resistência de 5,0%, já para a argamassa de 25% RCV o decréscimo foi de 15% ambos em relação à argamassa de referência. Para a relação água/aglomerantes = 0,45, para a decréscimos médios de 9% e 18%, para as argamassas de 15 e 25% RCV respectivamente, ambos em relação à referência. Por fim, para a relação água/aglomerantes = 0,55, foi observado decréscimos médios de 14% e 28%, para as argamassas de 15 e 25% RCV. Contudo, comprovou-se que a utilização de RCV na composição do cimento Portland propicia redução na resistência à compressão das argamassas em percentual inferior ao teor de RCV utilizado, desde que avaliado em idades a partir de 56 dias.

No ensaio de porosidade das argamassas, constatou-se que a redução do teor de cimento Portland resultou no aumento da porosidade das argamassas, pois, para as argamassas com os diferentes teores de RCV observou-se o aumento da porosidade. Para a relação água/aglomerantes igual a 0,35, na argamassa de referência houve uma redução na porosidade 18,2% para a idade de 56 dias, para os diferentes teores de substituição observou-se uma redução de 15,7 e 15,4% para as argamassas de 15 e 25%

RCV, respectivamente. Para a relação água/aglomerantes = 0,45, a argamassa de referência apresentou menor porosidade se comparada com as argamassas contendo RCV independente do teor, para as argamassas de 15 e 25% RCV a porosidade foi similar, nos 56 dias de idade. Para a relação água/aglomerantes = 0,55, a argamassa de referência apresentou uma redução de 13,0% na porosidade, as argamassas com 15 e 25% RCV apresentaram decréscimo de 9,0 e 9,7%, respectivamente.

Contudo, foi estabelecido uma relação entre porosidade e resistência à compressão, para a argamassa de referência, 15% RCV e 25% RCV, considerando as diferentes relações água/aglomerantes, onde foi possível concluir o decréscimo da resistência está exponencialmente relacionada com o aumento da porosidade.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho, para o Resíduo de Cerâmica Vermelha utilizado não se estabeleceu um critério de diâmetro de partículas, o material empregado foi o obtido nos dois processos de cominuição. Desta forma, sugere-se que estudos semelhantes sejam realizados, fixando a dimensão da adição em partículas menores que 75 μm .

Sobre as relações água cimento utilizada para a argamassa de referência 0,35; 0,45; 0,55 que para as argamassas 15 e 25% RCV passa a ser a relação água/aglomerantes, a sugestão fica a cerca de desenvolver uma pesquisa, onde seja determinado a nova relação/água cimento para cada traço no âmbito das substituições, onde leva-se em consideração o teor de absorção do RCV, e assim cada resultado seria comparado com a sua referência de mesma relação água/cimento.

6. REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, P. S. X. **Desenvolvimento de Argamassas com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha para a Aplicação no Cotidiano de Obras.** Trabalho de Conclusão de Curso. Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

ÂNGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos.** Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

ÂNGULO, S. C.; TEIXEIRA, C. E.; CASTRO, A. L.; NOGUEIRA, T. P. **Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação.** Artigo Técnico. Revista Eng. Sanit. Ambient. v.16, n.3, p. 299-306 jul/set 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.007 – Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.751 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.752 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.752 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.736 – Cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.653 – Materiais pozolânicos – Especificação.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.753 – Cimento Portland – Ensaio de pozolanidade para cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.895 – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de Cálcio fixado – Método Chapele modificado.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.578 – Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2000.

AZEVEDO, G. O. D.; KIPERSTOK A.; MORAES, L. R. S., **Resíduos da Construção Civil em Salvador: Caminhos para uma Gestão Sustentável.** Artigo Técnico. Revista Eng. Sanit. Ambient. Vol. 11, n 1, p. 65-72, Jan/mar 2006.

BARBOSA, M. P. **Concreto fresco: influência do empacotamento de partículas e outros fatores**. Introdução à ciência dos materiais aplicados à engenharia civil. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

BERNARDES, A. **Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição na cidade de Passo Fundo**. Dissertação de Mestrado. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006.

BERNARDES, A. *et al.* **Quantificação e Classificação dos Resíduos da Construção e Demolição Coletados no Município de Passo Fundo, RS**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 65-76, jul./out. 2008.

CARNEIRO, A.P. *et al.* **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. In: CASSA, J.C.S. *et al.* (Org). Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom. Salvador, 2001.

CARELI, E. D. **A Resolução CONAMA nº 307/2002 e as novas condições para gestão de resíduo de construção e demolição**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2008.

CAPARO, A.; BRAGA, V.; OLIVEIRA, I.; MEDEIROS, M., HOPPE FILHO, J. **Avaliação do Ataque Interno por Sulfatos em Pastas de Cimento Dosadas com Diferentes Teores de Pirita**. Belém do Pará: Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. Abril/2016.

CONCEIÇÃO FILHO, V.M. e MOREIRA, M.D. **Depósitos de argila do Recôncavo Baiano – geologia e potencialidade econômica**. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 2001.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002**: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

FACINCANI, E. **Tecnologia cerâmica** – I laterizi. Itália, Gruppo Editoriale Faenza Editrice. Faenza. Segunda edição, 1992.

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

FASTOFSKI, D. C.; SCHAFER, M.; TELES, R. D.; KULAKOWSKI, M. P.; GONZÁLEZ, A. S.; KAZMIERCZAR, C. S., **Metodologia de caracterização do resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material pozolânico em pasta de cimento**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos - 5º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. Junho de 2014.

GARCIA, E., CABRAL JUNIOR, M., QUARCIONI, V. A., CHOTOLI, F. F. **Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico**. Revista Cerâmica Industrial, v. 19, n. 4, p. 31 - 38, Julho/Agosto 2014.

GARCIA, E., CABRAL JUNIOR, M., QUARCIONI, V. A., CHOTOLI, F.F. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de São Paulo**. Revista Cerâmica, p. 252- 258, 2015.

GOBBI, A. **Atividade Pozolânica de Adições Mineraias pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma Análise Crítica a Partir de Métodos Complementares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2014.

GONÇALVES, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

GRIGOLETTI, G.C. **Caracterização de Impactos Ambientais de Industrias de Cerâmica Vermelha do Estado do Rio Grande do Sul**. 2001. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

KARPINSK, L. A.; PANDOLFO, A.; REINEHR, R.; KUREK, J.; PANDOLFO, L.; GUIMARÃES, J. **Gestão diferenciada de resíduos de construção civil: uma abordagem ambiental**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2009.

KAZMIERCZAK, C.S. **Produtos de Cerâmica Vermelha**. Capítulo 18 do livro “Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência dos Materiais”. Volume 1. Editor: Geraldo C. Isaia. Editora: IBRACON, 2010.

LEITE, M. B., **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2001.

LEITE, M. B.; DAL MOLIN, D. **Avaliação da Atividade Pozolânica do Material Cerâmico Presente no Agregado Reciclado de Resíduo C&D**. 2002. *Sitienbus* n.26. Feira de Santana. p. 111-130. Jan/jun 2002.

LYRA, D.M; ASSIS, R. G; VIEIRA, G. L. **Caracterização de agregado reciclado de resíduo de construção civil segundo a NBR 15116**. Anais do 55º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON, Outubro/ 2013.

Marinho, A. L. B., **Produção de ligantes para argamassa obtida a partir da reciclagem de resíduo sólido de siderurgia – Escória de Forno Panela**. Trabalho de Conclusão de Curso. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

MEDEIROS, M. H. F., SOUZA, D. J., HOPPE FILHO, J., ADORNO, C. S., et al. **Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica**. Revista Matéria, v. 21, n.2, p.282 - 300 Rio de Janeiro Apr./June 2016.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo : Pini, 1994.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo : Pini, 2008.

NASCIMENTO JUNIOR, A. **Avaliação da Resistência à Compressão de Concreto Utilizando Adição de Resíduos de Cerâmica Vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2011.

Nita, C.; Jhon, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLÈRE, A. M.; BRON, R. **Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires**. In: Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris, 7^a e., v.II e IV, 1980.

SARDÁ, M. C. **Diagnóstico de Resíduo da Construção Civil Gerado no Município de Blumerau-SC. Potencialidades de Uso em Obras Públicas**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

SANTOS, H. N.; CÂNDIDA, A. C.; FERREIRA, T. K. S. **Ações Referentes a Gestão de Resíduos da Construção Civil em Araguari – MG**. Anais XVI Encontro Nacional dos Geógrafos. Porto Alegre, 2010.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Cerâmica Vermelha para Construção: Telhas, Tijolos e Tubos**. São Paulo, 2008.

SINDICATO da INDÚSTRIA da CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO SÃO PAULO. **Resíduos de Construção Civil e o Estado de São Paulo**, 2012.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatórios anuais**

Disponível em: <http://www.snic.org.br/>. Acessado em: janeiro de 2017.

SOUZA, D. J. **Capacidade de Adições Mineraias em Mitigar o Grau de Deterioração de Estruturas de Concreto Frente ao Ataque por Sulfatos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013.

SOUZA, U.E.L. de et. al., **Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva**. Revista Ambiente Construído, v.4, nº 4, p.33-46, 2004.

VIEIRA, A. de A. P. **Estudo de aproveitamento de resíduo de cerâmica vermelha com substituição pozolânica em argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2005.

WADA, P. H., **Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas *In loco***. Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2010.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1989.