

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

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POROSIDADE DE
ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR
RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA**

LORENA ROCHA SANTANA

**BARREIRAS-BA
SETEMBRO 2017**

LORENA ROCHA SANTANA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POROSIDADE DE
ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR
RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA**

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
SETEMBRO 2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

S232 Santana, Lorena Rocha.

Avaliação da resistência à compressão e porosidade de argamassa com substituição parcial de cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha. / Lorena Rocha Santana. – 2017.

81 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. 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. Resistência de materiais – Argamassa. 2. Materiais de construção. I. Hoppe Filho, Juarez. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD: 620.1

BIBLIOTECAS UFOB - Biblioteca Universitária de Barreiras

LORENA ROCHA SANTANA

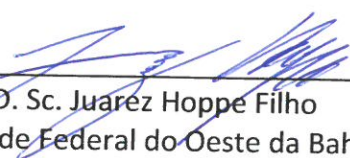
**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POROSIDADE DE
ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR
RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA**

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.

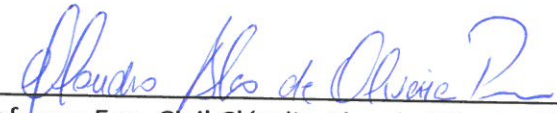
Aprovada em 26 de setembro de 2017.

Banca Examinadora

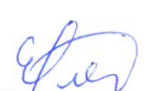
Orientador(a):



Professor D. Sc. Juarez Hoppe Filho
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)



Professor Eng. 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 meus pais, Iraci e Pedro (in memoriam), e meus irmãos, Caroline e Pedro Henrique, pelos sacrifícios, apoio e compreensão, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e compreensão.

Ao Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho, pela orientação e dedicação, que tornaram possível a elaboração deste trabalho; pelo constante incentivo à pesquisa; e pelos valiosos ensinamentos, ao longo de todos esses anos.

À Emanuella Correia Silva, Bianca Helem de Moraes Silva e Rizia Lorane Gonçalves Rodrigues pelas contribuições na realização dos ensaios, pela inestimável amizade e convivência durante esses anos.

À Leide Herllane, Helves Guedes, Guilherme Moreira, Camila Rodrigues e Marília Carmelita pela amizade e por toda a ajuda durante a realização desse curso.

À Sarha Souza, pela disposição em contribuir na elaboração deste trabalho.

À Juliana Araújo e Danillo Figueiredo pela ajuda na realização dos ensaios.

À todos os colegas e professores que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Enfim, a todos que tornaram possível chegar até aqui.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos da substituição parcial de cimento Portland por Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) cominuído, em argamassas com diferentes teores de substituição (15 e 25%, em massa) e diferentes relações água/aglomerantes (0,35; 0,45 e 0,55). Para tanto, foi analisada a consistência por meio do ensaio de mini tronco de cone de Kantro; a resistência à compressão axial e a porosidade das argamassas. Além disso, com o intuito de investigar a existência de atividade pozolânica do material, realizou-se o ensaio de pozolanicidade para cimento pozolânico – Ensaio Fratini, sendo classificada a composição composta por 75% de cimento Portland do tipo CP II Z – 32 e 25% de RCV como pozolânica após 15 dias de reação. A evolução do comportamento mecânico e da porosidade foi acompanhada até a idade de 56 dias, sendo que houve tendência de redução da resistência à compressão quando comparadas às respectivas argamassas de referência. Essa redução, entretanto, não foi proporcional ao teor de substituição. Constatou-se aumento do volume de vazios na matriz hidratada das argamassas contendo RCV.

Palavras-chave: Resíduo de cerâmica vermelha; resistência à compressão; porosidade.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	8
1.2	PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA.....	10
1.3	OBJETIVO.....	12
1.4	JUSTIFICATIVA.....	12
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA.....	14
2.2	RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV).....	15
2.3	ADIÇÕES MINERAIS.....	15
2.3.1	ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS.....	16
2.4	ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	17
2.5	USO DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA NA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS.....	19
2.5.1	INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ARGILA.....	19
2.5.2	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE QUEIMA.....	20
2.5.3	INFLUÊNCIA DA FINURA DO RCV.....	22
2.5.4	EFEITO QUANTO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E POZOLANICIDADE.....	22
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	MATERIAIS.....	27
3.1.1	CIMENTO PORTLAND.....	27
3.1.2	RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV).....	27
3.1.3	AGREGADO MIÚDO.....	30
3.2	COMPOSIÇÃO DOS AGLOMERANTES.....	31
3.3	MÉTODOS.....	31
3.3.1	ENSAIO DE POZOLANICIDADE PARA CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO.....	32
3.3.2	ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND E RCV.....	33
3.3.2.1	MISTURA DAS ARGAMASSAS.....	34
3.3.2.2	ENSAIO NO MINI TRONCO DE CONE DE KANTRO.....	34
3.3.2.3	MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	35
3.3.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	36

3.3.4	POROSIDADE DAS ARGAMASSAS	37
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV).....	40
4.2	ENSAIO DE POZOLANICIDADE PARA CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO – ENSAIO FRATINI	41
4.3	ENSAIO DE MINI TRONCO DE CONE DE KANTRO	43
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	44
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO <i>VERSUS</i> RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTES – CURVAS DE ABRAMS.....	49
4.6	POROSIDADE DAS ARGAMASSAS	53
4.7	RELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO <i>VERSUS</i> POROSIDADE	57
4.8	ANÁLISE COMPARATIVA COM O ESTUDO DE SOUZA (2017)	60
4.8.1	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RCV	60
4.8.2	ENSAIO DE ESPALHAMENTO NO MINI TRONCO DE CONE DE KANTRO.....	61
4.8.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS CONTENDO RCV EM RELAÇÃO ÀS ARGAMASSAS DE REFERÊNCIA	62
4.8.4	ENSAIO DE POZOLANICIDADE PARA CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO – ENSAIO FRATINI	65
4.8.5	POROSIDADE DAS ARGAMASSAS CONTENDO RCV COM DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS	66
5.	CONCLUSÃO.....	68
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	70
7.	REFERÊNCIAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da produção de cerâmica por região.	14
Figura 2 – Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado para a moagem do RCV.	28
Figura 3 – Agitador de peneiras utilizado para a separação da fração de partículas com dimensão inferior a 75 μm	28
Figura 4 – Aspecto físico do RCV cominuído após o peneiramento.	29
Figura 5 – Distribuição granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha.	29
Figura 6 – Curva granulométrica do agregado miúdo.	30
Figura 7 – Metodologia de estudo	32
Figura 8 – Ensaio de espalhamento no mini tronco de cone de Kantro em argamassa com 25% de RCV e relação água/aglomerante = 0,35.	35
Figura 9 – Corpos-de-prova de argamassa após a moldagem.	35
Figura 10 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão axial.	36
Figura 11 – Corpo-de-prova disposto na prensa hidráulica para ensaio de resistência à compressão.	37
Figura 12 – Ultrafreezer utilizado para a paralisação das reações de hidratação das amostras de argamassas.	38
Figura 13 – Liofilizador utilizado para a secagem, por sublimação, das amostras de argamassas.	38
Figura 14 – Balança hidrostática.	39
Figura 15 – Perfil difratométrico do Resíduo de Cerâmica Vermelha.	40
Figura 16 – Resultados do ensaio Fratini para o cimento CP II – Z, 15% RCV e 25% RCV. ...	42
Figura 17 – Espalhamento das argamassas determinado por meio do ensaio no mini tronco de cone de Kantro.	43
Figura 18 – Evolução da resistência à compressão axial das argamassas estudadas na relação água/aglomerantes = 0,35.	45
Figura 19 – Evolução da resistência à compressão axial das argamassas estudadas na relação água/aglomerantes = 0,45.	46
Figura 20 – Evolução da resistência à compressão axial das argamassas estudadas na relação água/aglomerantes = 0,55.	47

Figura 21 – Evolução percentual da resistência à compressão axial das argamassas com substituição parcial do cimento por RCV em relação às respectivas argamassas de referência.....	48
Figura 22 – Curvas de Abrams das argamassas na idade de 7 dias.....	50
Figura 23 – Curvas de Abrams das argamassas na idade de 28 dias.....	51
Figura 24 – Curvas de Abrams das argamassas na idade de 56 dias.....	52
Figura 25 – Evolução da porosidade das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,35.....	54
Figura 26 – Evolução da porosidade das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,45.....	55
Figura 27 – Evolução da porosidade das argamassas com relação água/aglomerante de 0,55.....	56
Figura 28 – Relação resistência à compressão <i>versus</i> porosidade da argamassa de referência.....	57
Figura 29 – Relação resistência à compressão <i>versus</i> porosidade da argamassa de contendo 15% de RCV na composição do material cimentício.	58
Figura 30 – Relação resistência à compressão <i>versus</i> porosidade da argamassa de contendo 25% de RCV na composição do material cimentício.	59
Figura 31 – Distribuição granulométrica do RCV utilizado no estudo de Souza (2017) e do mesmo pó cerâmico após o peneiramento em peneira com abertura de malha de 75 μ m.	61
Figura 32 – Espalhamento das argamassas em função das diferentes distribuições granulométricas utilizadas na execução das argamassas.	61
Figura 33 – Análise comparativa da resistência à compressão percentual das argamassas contendo 15% de RCV, com diferentes distribuições granulométricas, em relação às argamassas de referência.....	63
Figura 34 – Análise comparativa da resistência à compressão percentual das argamassas contendo 25% de RCV, com diferentes distribuições granulométricas, em relação às argamassas de referência.....	64
Figura 35 – Resultados do ensaio Fratini para o cimento CP II – Z, 15% RCV e 25% RCV para as diferentes granulometrias.....	65

Figura 36 – Porosidade das argamassas contendo RCV em diferentes teores e finuras, aos 7 dias.....	66
Figura 37 – Porosidade aos 28 dias	67
Figura 38 – Porosidade aos 56 dias	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria do resíduo de cerâmica vermelha.....	29
Tabela 2 – Composição, em massa, dos aglomerantes utilizados no estudo.	31
Tabela 3 – Proporções de mistura das argamassas.....	33
Tabela 4 – Resultados do ensaio Fratini, aos 8 e 15 dias de idade, das composições aglomerantes contendo RCV.	41
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial	44
Tabela 6 – Porosidade das argamassas	53
Tabela 7 – Características granulométricas do RCV em ambos os estudos	60

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância do tema

O setor da construção civil ocupa posição de destaque na economia nacional. Segundo dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), em 2016, a participação do setor no PIB nacional foi de 5,6%. Entretanto, em virtude do elevado consumo de recursos naturais e extração de matérias-primas de jazidas, bem como da grande geração de resíduos, o setor é também visto como determinante na geração de impactos ambientais.

Devido à grande variedade de aplicações, o cimento Portland é utilizado de maneira significativa na construção civil. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2016, entre os meses de janeiro e novembro, o consumo total no país foi de 53,3 milhões de toneladas. Seu processo produtivo, entretanto, é um dos processos industriais que causa maior impacto ambiental.

Segundo John (2000), a produção do cimento é responsável por 5,0% do CO₂ lançado na atmosfera, o que ocorre, em grande parte, durante a clínquerização, tanto devido a descarbonatação do calcário como à queima de combustíveis fósseis, nos fornos dos parques industriais. Acrescenta-se, ainda, o elevado consumo de matérias-primas e a grande quantidade de resíduos sólidos gerados. Dessa forma, estudos com o intuito de mitigar os efeitos causados pelos impactos ambientais gerados, tornam-se imprescindíveis para a inserção da indústria cimenteira nos preceitos mundiais de sustentabilidade. Já existem diversas iniciativas com esse objetivo, uma delas trata-se do uso de adições minerais na composição do cimento Portland.

A incorporação de adição mineral à composição do cimento Portland através da utilização de resíduos provenientes de outros setores produtivos mitiga o passivo ambiental destas e reduz o consumo de insumos para a produção do clínquer. Além disso, reduzem o consumo de energia, tanto devido à redução no transporte de matérias-primas como pela incorporação da energia dos resíduos industriais, contribuindo para a redução de emissão de CO₂ na atmosfera. Estudos têm sido desenvolvidos em busca de novos materiais provenientes de resíduos industriais para a sua utilização na composição do cimento, entre eles os resíduos de cerâmica vermelha (RCV).

A indústria cerâmica, no executar das atividades inerentes ao processo produtivo, gera resíduos que requerem adequada destinação. Os produtos de cerâmica vermelha, ao serem transportados do parque fabril aos empreendimentos são parcialmente danificados e, muitas vezes, descartados como entulhos. Por fim, o transporte interno no canteiro de obras e a aplicação dos produtos produzem quebras e sobras que também são tratados como resíduos. Portanto, o volume de RCV produzido na indústria da construção é considerável e, por ser enquadrado como resíduo classe A conforme as diretrizes da Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), é passível de reutilização ou reciclagem.

Atualmente o RCV já é utilizado para a produção de agregado reciclado destinado à execução de argamassas de revestimento e assentamento, com restrições quanto ao uso em peças com fins estruturais. De fato, a reciclagem requer que o RCV seja britado até apresentar distribuição granulométrica adequada para o uso em argamassas, ou seja, demanda consumo energético para a reinserção do resíduo na cadeia produtiva. Por outro lado, o RCV quando finamente cominuído potencializa sua capacidade de interação com a cal e, desta forma, se apresentar adequada reatividade pode ser classificado como adição mineral pozolânica passível de incorporação na composição do cimento Portland.

As argilas, por si sós, não possuem propriedades pozolânicas, visto que seus minerais constituintes apresentam-se cristalinos. Segundo Castro *et al.* (2017), no processo de sinterização, em torno de 500 a 800 °C, há desidroxilação dos argilominerais, podendo ocorrer transformação para a fase amorfa. Segundo Zampieri (1989), a ativação térmica promove a perda de água de cristalização dos argilominerais e a formação de um material atômicaamente desarranjado, com alto grau de desordem cristalina. Além disso, o desenvolvimento das propriedades pozolânicas dos materiais argilosos também é função, principalmente, da natureza e conteúdo do argilomineral presente e da finura do produto.

Alguns estudos, como o de Garcia *et al.* (2014) e Garcia *et al.* (2015), atestam a potencialidade do uso do resíduo como substituição parcial do cimento Portland. Ainda assim, as pesquisas voltadas para a utilização do RCV na composição de cimento Portland são incipientes. É necessário que seja feita maior análise das características físico-químicas e dos demais aspectos envolvidos na interação com o cimento Portland para a sua utilização na composição da matriz cimentícia.

No estudo apresentado por Souza (2017), verificou-se a diminuição da resistência à compressão das argamassas com substituição de cimento Portland por RCV, porém de forma não proporcional ao teor de substituição. O resíduo utilizado no estudo foi caracterizado como não pozolânico. Assim, a redução na resistência à compressão foi considerada pela autora como sendo devido à baixa reatividade do resíduo. O presente estudo visa contribuir com conhecimento acerca da influência da substituição parcial do cimento Portland por RCV com ênfase na resistência à compressão axial e na porosidade da matriz hidratada. Os resultados obtidos serão comparados aos resultados apresentados por Souza (2017), a qual utilizou RCV com granulometria grosseira, onde a maior parcela das partículas apresentava dimensão superior a 75 μm .

1.2 Principais pesquisas relacionadas ao tema

A seguir, são apresentadas as principais pesquisas, publicadas nos últimos 5 anos, quanto à caracterização, atividade pozolânica e efeito da substituição parcial de cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha. Destacam-se os seguintes trabalhos:

- Oliveira *et al.* (2012), com a análise da atividade pozolânica em argamassas com substituição parcial de cimento por diferentes resíduos (vidro, tijolos e telhas de cerâmica vermelha) em diferentes finuras. A redução no diâmetro das partículas provocou um aumento significativo na resistência da argamassa.
- Garcia *et al.* (2014), com a análise da influência da temperatura e da composição química de massas cerâmicas nas propriedades pozolânicas e a potencialidade para substituição parcial do cimento Portland na produção de argamassas. Os autores constataram significativa capacidade de fixar cal, classificando o material como pozolânico.
- Sales e Alferes Filho (2014), com a análise da utilização de pó de resíduo de cerâmica em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos, em teores de 10, 20 e 40%, em massa. Para tanto, foram realizados ensaios mecânicos e físicos. Também avaliaram a atividade pozolânica do resíduo em argamassas, sendo constatado a pozolanicidade do material.

- Cassol (2015) caracterizou o RCV com diferentes tempos de moagem, por meio de ensaios de microanálise, difratometria de raios-X, análise termogravimétrica, perda ao fogo e microscopia eletrônica de varredura (MEV). No estudo, analisou-se, ainda, a resistência à compressão de argamassas com substituição de 10, 20 e 30%, em massa, de cimento por RCV, e tempos de moagem de 20 e 40 min, comparando-o à argamassa sem substituição. Constatou-se a redução de resistência à compressão nas argamassas contendo RCV nas primeiras idades (3 e 7 dias). Entretanto, aos 28 dias, para o maior tempo de moagem, as argamassas apresentaram valores de resistência semelhantes aos obtidos para a referência. Também foi realizada análise termogravimétrica, confirmando-se, a sua atividade pozolânica.
- Garcia *et al.* (2015), com a análise da influência da temperatura e da composição química nas propriedades pozolânicas do RCV, provenientes dos quatro principais polos paulistas. No Ensaio Chapelle, as amostras apresentaram consumo médio de 500 mg de Ca(OH)_2 /grama de RCV, classificando o material como pozolânico.
- Freitas e Oliveira (2016), as quais realizaram a verificação da viabilidade da utilização dos RCV, através de ensaios químicos, físicos e mecânicos. As autoras avaliaram a resistência à compressão de argamassas com substituição de cimento por RCV em teores de 5, 6 e 7% (em massa). Constatou-se redução na resistência em função do aumento do teor de substituição.
- Medeiros *et al.* (2016), os quais avaliaram a influência da incorporação do RCV moído na composição do cimento Portland sobre a resistência à ocorrência de reação álcali-sílica (RAS) e resistência ao ataque por sulfato de sódio. A maior finura do RCV impactou, positivamente, no comportamento do material frente à degradação.
- Silva *et al.* (2016), com análise da atividade pozolânica do resíduo de cerâmica vermelha na substituição parcial do cimento Portland em argamassas. Para tanto, analisou-se argamassas com teor de substituição de 25% de RCV, em massa, e relação água/aglomerante igual a 0,48 por meio de ensaios de resistência à compressão simples e Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento. Constatou-se redução da resistência nas argamassas com RCV. O IAP com cimento obtido foi inferior ao mínimo exigido pela NBR 12.653:2014.

- Castro *et al.* (2017) que, durante o estudo produziram cimento utilizando o resíduo de cerâmica vermelha como adição mineral. Foram analisados, a composição química, as propriedades físicas (massa específica, área superficial específica, água da pasta de consistência normal, tempo de pega e estabilidade volumétrica) e mecânicas (resistência à compressão) desses cimentos e foram comparadas com as propriedades de cimentos compostos comerciais.
- Souza (2017) que analisou a influência na resistência à compressão axial e na porosidade de argamassas decorrentes da substituição do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) cominuído em diferentes teores e em diferentes relações água/cimento. A incorporação do resíduo resultou em diminuição da resistência à compressão em relação à referência. Essa redução, entretanto, não foi proporcional ao teor de substituição.

1.3 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha, de forma a comparar os resultados obtidos ao estudo de Souza (2017), quanto à resistência mecânica e à porosidade de argamassas.

1.4 Justificativa

No estudo realizado por Souza (2017), referência inicial deste trabalho, analisou-se a resistência à compressão axial e a porosidade de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) cominuído em diferentes teores e em diferentes relações água/aglomerantes. A autora avaliou, ainda, a pozolanicidade do material através de ensaio Fratini e de difratometria de raios-X. No estudo, a substituição parcial do cimento por resíduo de cerâmica vermelha para os teores de 15 e 25% provocou uma redução na resistência à compressão das argamassas. A autora também constatou que a redução do teor de cimento Portland resultou no aumento da porosidade das argamassas. Através do ensaio Fratini, foi verificada a não pozolanicidade do material nos teores estudados. Entretanto, segundo Garcia *et al.* (2015), as partículas com dimensão inferior a 75 μm são capazes de apresentar reatividade suficiente para atribuir-lhes

pozolanicidade. No estudo de Souza (2017), apenas 6,4 % do material possuía dimensão inferior a 75 μm . Segundo a autora, 72,9% do RCV utilizado foi caracterizado como agregado miúdo. Assim, no presente trabalho, foi utilizado o resíduo com partículas com dimensão inferior a 75 μm , de forma a avaliar a influência da finura nas mesmas propriedades analisadas pela autora, mantendo os mesmos teores de substituição e mesmas relações água/aglomerantes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

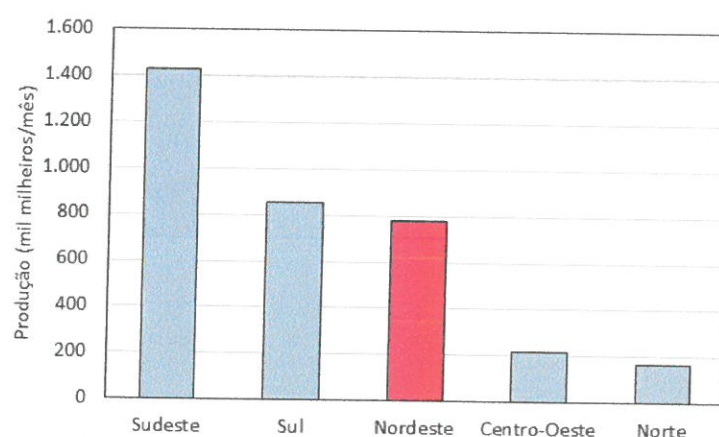
2.1 Indústria de Cerâmica Vermelha

O setor de cerâmica vermelha é responsável por produzir componentes essenciais para vários setores produtivos. Destacam-se, como principais produtos: blocos, tijolos, telhas, lajes, lajotas, ladrilhos vermelhos, tubos, além de objetos ornamentais e utensílios domésticos. Segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), em 2016, o setor representou 4,8% do faturamento anual da indústria da construção civil.

Os últimos dados divulgados pela ANICER sobre a distribuição da produção de cerâmica por regiões foram publicados em 2008 e denotam a relevância da região Nordeste no Parque Industrial de Cerâmica, conforme pode ser visto na Figura 1. Existe certa carência de dados atuais sobre a indústria cerâmica no Brasil, devido ao alto índice de informalidade existente em toda a cadeia de construção civil do país, o que dificulta uma maior atualização nos dados do setor.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), estima-se que o consumo de cerâmica vermelha, em 2015, atingiu 260 peças por habitante, sendo 75% correspondente a blocos e tijolos, e 25% a telhas.

Figura 1 – Distribuição da produção de cerâmica por região.



Fonte: ABDI (2016).

Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), no Plano Nacional de Mineração 2030, elaborado pelo MME, é previsto o crescimento, até 2030, de

três a cinco vezes em relação à produção de cerâmica vermelha de 2008. Ainda, segundo a agência, o crescimento no consumo total medido em unidades poderá atingir mais de 170 bilhões em 2022, já o consumo per capita deverá variar entre 600 e 900 peças/habitantes nesse mesmo ano.

2.2 Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV)

A indústria cerâmica, no executar das atividades inerentes ao processo produtivo, gera resíduos que requerem adequada destinação. O principal deles consiste em peças cerâmicas quebradas e/ou trincadas após o processo de queima que, muitas vezes, são descartadas como entulhos.

Há certa divergência com relação aos dados de geração de resíduos cerâmicos no país. Alguns estudos apontam que as perdas podem variar de 3 a 5% em relação ao total produzido (Garcia *et al.*, 2014). Já segundo o MME (2009), as perdas no pós-queima podem atingir até 20% da produção nas indústrias com menor capacidade tecnológica.

Além disso, os produtos de cerâmica vermelha são parcialmente danificados, ao serem transportados do parque industrial aos empreendimentos, na aplicação dos produtos e no transporte interno no canteiro de obras. Portanto, o volume de resíduo de cerâmica vermelha produzido na indústria da construção é considerável e, por ser enquadrado como resíduo classe A, conforme as diretrizes da Resolução 307 do CONAMA, é passível de reutilização ou reciclagem.

Atualmente, vem sendo estudado o reaproveitamento do resíduo de cerâmica vermelha como adição mineral em argamassas e concretos. Outras opções que estão sendo praticadas são: cascalhamento de estradas, em pavimentação, como agregado reciclado e como chamote¹, sendo reutilizado na produção de novos produtos cerâmicos.

2.3 Adições Minerais

Na definição de Malhotra e Mehta (1996) *apud* Fonseca (2010), o termo adição, refere-se, de maneira geral, a qualquer material além de água, agregados e cimento, que é

¹ Resíduo de cerâmica vermelha queimado reincorporado às massas cerâmicas para produção de novos produtos

utilizado como um ingrediente do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura.

Segundo Fonseca (2010), as adições minerais têm sido utilizadas como insumo para a construção civil de forma cada vez mais intensa nas últimas décadas, sendo grande parte delas composta por resíduos provenientes de siderúrgicas, usinas termelétricas, indústrias e mineradoras. Estas adições são: a sílica ativa, a cinza volante, a escória granulada de alto-forno e o fíler. Segundo o autor, as adições podem ser classificadas em três grandes grupos, conforme sua ação físico-química no concreto: materiais inertes, materiais cimentantes e materiais pozolânicos. Essa classificação, entretanto, diverge na literatura. Carmo e Portella (2008) classificam as adições minerais em função da sua composição química e mineralógica, em: escória granulada de alto-forno, cimentante e pozolânico e pozolanas comuns. Mehta e Monteiro (1994) propõem uma classificação para as adições minerais, de acordo com suas características pozolânicas ou cimentantes. Para os autores, as adições minerais podem ser classificadas em: cimentantes; cimentantes e pozolânicos; pozolanas altamente reativas; pozolanas comuns e pozolanas pouco reativas.

2.3.1 Adições minerais pozolânicas

Segundo a NBR 12.653:2014 – Materiais pozolânicos – Especificação, o material pozolânico pode ser definido como material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença de umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos cimentantes. As adições minerais pozolânicas são classificadas quanto à sua origem, e quanto às suas características físicas e químicas.

Quanto à origem, as pozolanas são classificadas em naturais e artificiais. As pozolanas de origem natural são materiais de origem vulcânica ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. As pozolanas de origem artificial são materiais provindos de tratamento térmico e são mais comumente utilizadas.

Os materiais pozolânicos também são classificados pela NBR 12.653:2014 em classes, segundo suas características físicas e químicas. A Classe N enquadra tanto pozolanas naturais quanto artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Já a classe C contempla as cinzas

volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. As pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores são classificadas em classe E.

Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais podem produzir efeitos físicos e químicos na microestrutura das argamassas e concretos. Alguns dos efeitos físicos gerados pelas adições minerais podem ser do tipo microfíler, refinamento dos poros e dos produtos de hidratação. Já o efeito químico está relacionado com a capacidade de reação com o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento Portland.

O efeito microfíler pode ocorrer devido ao diminuto tamanho das partículas das adições, cujo diâmetro deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento. As partículas se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, aumentando a densidade da mistura e reduzindo o espaço disponível para a água (DAL MOLIN, 2005; ALMEIDA, 1992 apud WEBER, 2001).

O refinamento dos poros e dos produtos de hidratação do cimento também estão relacionados ao tamanho das partículas das adições minerais. As pequenas partículas podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, de forma que, o crescimento dos cristais de hidróxido de cálcio ocorra não somente na interface da pasta, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água. Esse fator influencia na cinética da hidratação, e nos tipos de produtos de hidratação formados (DAL MOLIN, 2005).

Segundo Carmo e Portella (2008), o efeito químico das adições minerais está relacionado com a capacidade de reação com o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas. A atividade pozolânica, segundo os autores, origina-se da instabilidade termodinâmica existente quando estes materiais entram em contato com a água saturada de hidróxido de cálcio, devido à estrutura desordenada principalmente da sílica e alumina existentes na pozolana.

2.4 Atividade pozolânica

Os principais compostos desse aglomerante são: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Esses compostos, ao se hidratarem, cristalizam-se em três fases distintas principais: silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), cristais de hidróxido de cálcio (CH) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H) constitui cerca de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, enquanto os cristais de hidróxido de cálcio (CH) constituem cerca de 20 a 25%, e os sulfoaluminatos de cálcio hidratado ocupam cerca de 20 a 15% do volume de sólidos da pasta endurecida. Os silicatos de cálcio hidratados são os compostos responsáveis pela alta resistência. O hidróxido de cálcio, em geral possui cristal grande e com certa fragilidade, não contribuindo para a resistência mecânica da matriz endurecida. A depender da sua quantidade, pode tornar a pasta suscetível à ataques químicos.

Segundo Kihara e Centurione (2005), os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio, formado na hidratação do cimento (C_3S e C_2S), produzindo novos compostos aglomerantes, como os silicatos de cálcio hidratado. Segundo Farias Filho (2000), isso ocorre devido à presença de silício e de alumínio amorfos na composição das pozolanas. Quanto maior o desarranjo estrutural do material e a sua instabilidade em meio básico, mais intensamente será a reação pozolânica. Segundo Nascimento Júnior (2011), as partículas que não reagem com os produtos de hidratação do cimento e os outros compostos formados durante a reação pozolânica, como os (C-A-H), atuam reduzindo a porosidade da estrutura resultante por efeito fíler. A combinação dos efeitos pozolânico e fíler decorrentes das adições pozolânicas representa uma contribuição importante para a resistência e durabilidade da pasta endurecida.

Segundo Cassol (2015), é difícil encontrar uma metodologia que sirva para a classificação de todos os tipos de pozolanas, que seja rápida e precisa e que seus resultados possam ser relacionados com as características do material. A atividade pozolânica deve levar em consideração as características químicas, morfológicas e físicas do material, e a resistência mecânica dos produtos da reação pozolânica com a cal ou com o cimento.

Segundo Dal Molin (2005), uma das formas de se analisar a pozolanicidade é através do acompanhamento da resistência à compressão ao longo do tempo de pastas e argamassas. As reações da pozolana com a cal resulta em materiais cimentantes. Espera-se assim que, com a ocorrência de reação pozolânica, haja um aumento na resistência do material estudado.

Outro ensaio relacionado à pozolanicidade do material é o ensaio Fratini, que 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. (DAL MOLIN, 2005)

2.5 Uso do resíduo de cerâmica vermelha na composição de argamassas

O pó cerâmico teve ampla utilização em argamassas, no decorrer dos séculos. Segundo Santiago (2007), referências a este ingrediente são encontradas na bibliografia desde o século I a.C., havendo variação, ao longo de todo esse período apenas quanto ao tipo de cerâmica utilizada na pulverização (tijolos ou telhas, novos ou velhos) e sua proporção de uso, além da inclusão ou não de outros componentes na mistura e no tipo de aglomerante utilizado. Segundo Zampieri (1989), o primeiro material ligante utilizado pelo homem, nas primeiras construções, provavelmente foi a terra argilosa, há 10.000 anos. Santiago (2007) também relata a existência de diversas referências ao uso do material cerâmico moído nas argamassas, sendo o pó passado por peneira de padeiro, visto que propiciaria maior homogeneização do produto final.

Estudos anteriores que trataram de resíduos da indústria cerâmica obtiveram resultados que mostram que o resíduo de cerâmica vermelha moída, quando adicionado ao concreto ou argamassas, apresentam propriedades pozolânicas. Segundo Vieira (2005), o comportamento pozolânico ou inerte do resíduo da cerâmica vermelha é função da temperatura de sinterização das peças cerâmicas, bem como da composição química e mineralógica da massa cerâmica. Para Zampieri (1989), o desenvolvimento das propriedades pozolânicas dos materiais argilosos é função, principalmente, da natureza e do conteúdo do argilomineral presente, das condições de calcinação e da finura do produto. Assim, há que se analisar a influência dessas três características do material citadas por Zampieri (1989): composição química, temperatura de queima e finura do RCV.

2.5.1 Influência da composição química da argila

As argilas constituem a matéria-prima essencial para a indústria ceramista. Devido à suas propriedades e características variadas, para o seu uso adequado, torna-se necessário o conhecimento prévio das propriedades tecnológicas, verificando a compatibilidade com o fim a qual se destina. Segundo a Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração do Estado

da Bahia (SICM) (2005), as argilas de queima vermelha ou argilas comuns são as que mais se destacam entre as substâncias minerais, por causa do volume de produção e do maior consumo, sendo especialmente utilizadas na produção de cerâmica vermelha e de revestimento.

O setor de cerâmica vermelha utiliza a chamada massa monocomponente, composta, basicamente, só por argilas. Não há mistura de outras substâncias minerais, como caulim, filito, rochas feldspáticas, talco e rochas calcárias, como é comum em outros segmentos da indústria cerâmica, como das louças de mesa e sanitários. Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) (2016), a massa resultante é composta por matéria orgânica, impurezas e minerais de ferro, que permitem sua sinterização a temperaturas entre 900 e 1.100 °C.

A formulação da massa cerâmica é feita geralmente de forma empírica pelo ceramista. É realizada a mistura de uma argila denominada “gorda”, de alta plasticidade e granulometria fina, com uma argila “magra”, rica em quartzo e menos plástica, utilizada com o intuito de auxiliar nos processos de secagem e queima das peças. (ABDI, 2016)

Para cada finalidade do produto, as argilas utilizadas para sua fabricação devem possuir diferentes características. As argilas utilizadas para a fabricação de tijolos costumam apresentar teores moderados de ferro, elementos alcalinos, e alcalino-terrosos, que são desejáveis por facilitarem a sinterização, mas em teores elevados são prejudiciais por causarem colorações indesejáveis, excessiva retração, e outros defeitos à queima. (SCIM, 2005)

Os tipos de argilas mais comumente utilizadas são as cauliníticas (com menor retenção de água), as montmoriloníticas (plásticas e com muita retenção de água) e as ilíticas. Essa diferente composição de argilas confere ao produto final diferentes características físicas e mecânicas. (PRADO, 2011)

2.5.2 Influência da temperatura de queima

Segundo Castro *et al.* (2017), a massa monocomponente utilizada na indústria de cerâmica vermelha, não possui propriedades pozolânicas, visto que seus minerais são encontrados em estado cristalinos. Para ativação das argilas é necessário que seja feita um tratamento térmico, em temperaturas em torno de 500 a 800 °C, para a desidroxilação dos

argilominerais. Segundo Vieira (2005), para temperaturas acima de 650 °C há formação de fases amorfas, capazes de desenvolver propriedade pozolânica. Isso ocorre devido a alteração na estrutura cristalina das argilas, causada pela ativação térmica, formando um aluminossilicato com estrutura amorfa, que determina o grau de atividade pozolânica do material.

Em temperaturas acima de 900 °C, há formação de fases cristalinas estáveis, que inibem a reatividade do RCV. Segundo Garcia *et al.* (2014), como as temperaturas usuais de queima empregadas no processo produtivo de blocos e telhas cerâmicas variam entre 700 e 900 °C, os resíduos de cerâmica vermelha utilizados na construção, quando cominuídos em finura adequada, podem se tornar pozolanas ativas. Já segundo Winkler e Muller (1998) *apud* Leite e Dal Molin (2002), existem duas teorias sobre a reatividade dos materiais cerâmicos. Uma relaciona as propriedades pozolânicas dos tijolos com a fase vítrea solúvel que reage com Ca(OH)_2 formando C-S-H. Essa fase vítrea, segundo autores, só pode ser encontrada em tijolos queimados em temperatura acima de 950 °C. A segunda teoria diz que apenas os tijolos queimados a baixas temperaturas é que podem apresentar essa reatividade.

Segundo Zampieri (1989), as reações pozolânicas envolvendo argilas ativadas termicamente e o hidróxido de cálcio são reações de dissolução e formação de novas fases. No meio fortemente alcalino, característico das misturas contendo hidróxido de cálcio, os argilominerais ativados termicamente encontram-se em forte desequilíbrio físico-químico, proporcionando, a nível de superfície das partículas a dissolução do alumínio e silício. Numa etapa posterior, e em função da grande disponibilidade de cálcio nesse meio, observa-se a formação de aluminatos, silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratados.

A relação entre a temperatura de queima e a pozolanicidade do RCV foi analisada por Alcântara (2012). No estudo, a autora avaliou a capacidade de fixar cal das peças cerâmicas produzidas na indústria, com temperatura de sinterização entre 850 °C e 950 °C, bem como de peças queimadas e requeimadas de forma controlada no laboratório, com temperaturas de 850 °C, 950 °C e 1.050 °C. As amostras foram capazes de fixar CaO com índices entre 207 e 311 mg/g, não atingindo o consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de material para ser caracterizado como pozolânico.

2.5.3 Influência da finura do RCV

Vieira (2005) estudou a influência de diferentes finuras na reatividade do RCV, por meio de ensaios de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal e cimento. Os resultados obtidos no IAP com cal indicaram aumento da atividade pozolânica quanto maior a finura do RCV. Entretanto, esse aumento não ocorreu de forma linear. O IAP com cimento também indicou maior atividade pozolânica para as maiores finuras. Segundo a autora, os valores obtidos neste ensaio confirmaram a reação do resíduo com o hidróxido de cálcio. O trabalho avaliou ainda a influência da finura na consistência das argamassas, não sendo constatado variação conforme a diminuição das partículas do resíduo.

No estudo de Oliveira *et al.* (2012) também foi avaliada a substituição do cimento por RCV em diferentes finuras. Constatou-se aumento da resistência à compressão conforme a redução de tamanho de partículas dos pós. Além disso, a redução do tamanho das partículas foi responsável por uma discreta diminuição da consistência da argamassa fresca. Esta redução de consistência foi causada pelo aumento da superfície de argamassa promovida ao mesmo tempo pela maior finura dos pós cerâmicos e para a maior quantidade de incorporação do resíduo.

2.5.4 Efeito quanto à resistência à compressão axial e pozolanicidade

No trabalho de Farias Filho (2000), avaliou-se a potencialidade do uso da metacaulinita e dos resíduos de tijolos cerâmicos cominuídos, como substitutos parciais do cimento Portland. Os teores de substituição variaram, em massa, entre 20 e 50% e a relação água/cimento variou de 0,37 a 0,45. A evolução da resistência à compressão e à flexão das argamassas foi avaliada até as idades de 365 e 208 dias, respectivamente. Aos 28 dias, a resistência à compressão das argamassas com substituição foi superior à das argamassas de cimento Portland, para os teores de substituição e relações água/cimento estudados. Também foi determinado o índice de atividade pozolânica com cimento Portland. Os resultados obtidos indicaram que a metacaulinita e o tijolo moído queimado possuem elevada atividade pozolânica.

Vieira (2005) também analisou a substituição parcial do cimento por RCV na reologia, propriedades mecânicas e permeabilidade de argamassa e concretos. Para tanto, foram moldadas amostras de argamassas e concretos com teores de substituição de 20 e 40% em

massa, além das amostras de referência, sem substituição. Segundo a autora, a substituição parcial do cimento por resíduo de cerâmica vermelha na execução das argamassas com a substituição de 20 e 40% de cimento, provocou uma redução da resistência à compressão, não proporcional ao teor de substituição.

Rocha (2008) avaliou a potencialidade de utilização de dois resíduos industriais, resíduos do corte de rochas e de blocos cerâmicos, como adições minerais com características de fíler e pozolana, respectivamente, na fabricação de concretos de resistência convencional, com substituição parcial de cimento em teores de 10 e 20% em relação à massa de cimento, para cada uma das adições estudadas. Para o concreto com substituição de resíduos de blocos cerâmicos, houve uma pequena redução nas propriedades mecânicas em relação ao concreto de referência. Segundo a autora, isso pode ter ocorrido devido à pouca atividade pozolânica do resíduo, visto que, segundo a mesma, um aumento significativo na resistência só é conseguido com adições de alta pozolanicidade. Ainda assim, a autora concluiu, a partir dos resultados obtidos, que é possível a produção de concretos contendo resíduo de blocos cerâmicos com resistência convencional.

Nascimento Júnior (2011) avaliou as propriedades mecânicas de concreto com adição de resíduos cerâmicos, em substituição parcial ao cimento Portland, visando à produção de concretos para a construção civil. Os teores de substituição variaram de 10 a 30% (em massa). O estudo avaliou a trabalhabilidade e a resistência à compressão axial dos concretos produzidos. Segundo o autor, os resultados obtidos indicaram que a substituição de 10% do cimento Portland proporcionou aumento na resistência à compressão do concreto em relação à referência, já ara as substituições de 20 e 30% houve redução desse parâmetro.

Sales e Alferes Filho (2014) utilizou o pó de resíduo de cerâmica vermelha em substituição parcial do cimento Portland na produção de concreto, com substituição em teores de 10, 20 e 40%. Os ensaios de resistência à compressão mostraram que, aos 28 dias, houve redução de 11% dessa propriedade para a substituição de 10% do cimento; para a substituição de 20% do cimento houve aumento de 11%; e 17% de redução para a substituição de 40% do cimento. Os autores concluíram que a substituição do cimento por adição de pó cerâmico, nos teores estudados, não causou significativa redução da

resistência mecânica, rigidez e compacidade, indicando a viabilidade de sua aplicação em concretos.

No estudo de Garcia *et al.* (2014) foi analisada a reatividade do RCV por meio do ensaio Chapelle modificado. O teor mínimo de cal fixada para a classificação como pozolana é de 436 mg Ca(OH)_2 /grama de adição mineral, conforme Raverdy *et al.* (1980). Os resultados variaram entre 570 e 650 mg Ca(OH)_2 /grama de RCV. Dessa forma, os autores constataram significativa capacidade de fixar cal, classificando o material como pozolânico.

Garcia *et al.* (2015) estudaram as propriedades pozolânicas de amostras de RCV coletadas em quatro dos principais polos ceramistas paulistas, e suas relações com as composições das massas cerâmicas e com a temperatura de queima. No Ensaio Chapelle, as amostras apresentaram consumo médio de 500 mg de Ca(OH)_2 /grama de RCV superando em 14,7% o valor mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Segundo os autores, a máxima reatividade verificada situou-se na faixa de temperatura de queima entre 700 °C e 800 °C, usualmente utilizada na indústria de cerâmica vermelha. Dessa forma, os autores concluíram que os resíduos cerâmicos são adequados para a utilização como adição pozolânica para o cimento Portland.

No estudo de Cassol (2015) foi realizado a caracterização química e física do resíduo com diferentes tempos de moagem, 20 e 40 minutos, pelos ensaios de difração de raios – X, análise termogravimétrica (TGA e DTA), perda ao fogo e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microanálise (EDS). Além disso, foram realizados ensaios de resistência à compressão em diferentes composições de argamassa, variando-se o teor de substituição do cimento Portland pelo resíduo em 10, 20 e 30%, em massa, e para os diferentes tempos de moagem, 20 e 40 min. Todas as argamassas com substituição de RCV moído por 20 minutos apresentaram redução de resistência à compressão. Além disso, segundo a autora, quanto maior a substituição do cimento Portland pelo RCV maior a redução da resistência à compressão em relação à referência. Para as argamassas com RCV moído a 40 minutos, houve diminuição significativa dos valores de resistência à compressão nas primeiras idades. Aos 28 dias, entretanto, as argamassas apresentaram valores de resistência à compressão próximos aos da referência. Isso indica, segundo a autora, que a baixa atividade pozolânica do RCV ocorre de forma lenta, o que é considerado uma característica desse material.

Medeiros *et al.* (2016) avaliou 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. Foram avaliadas argamassas de cimento CP V – ARI, como referência, e composições com a substituição de 10% do cimento, em massa, por fíler calcário ou RCV, com três diferentes finuras. Segundo os autores, o RCV causou aumento na expansão por RAS e, na maior parte dos casos, também aumentou a expansão devido ao ataque por sulfato de sódio. A maior finura do RCV impactou, positivamente, no comportamento do material frente à degradação.

No estudo de Freitas e Oliveira (2016) avaliou-se a viabilidade da utilização dos resíduos provenientes do processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha como insumo para a fabricação de cimento Portland composto. Foram realizadas análises em laboratório de controle de qualidade da indústria cimenteira, através de ensaios químicos, físicos e mecânicos. O resíduo utilizado também foi peneirado com o intuito de analisar apenas o material com partículas inferiores à 75 μm . Para avaliação da resistência à compressão, foram moldados corpos de prova com 5, 6 e 7% de substituição. As idades de ensaio foram de 1, 3, 7 e 28 dias. Em todas as idades os resultados apresentaram queda na resistência à compressão conforme as adições foram aumentadas.

No estudo apresentado por Castro *et al.* (2017), o resíduo de cerâmica vermelha moído foi misturado ao cimento Portland de alta resistência inicial para a produção de cimentos compostos. Segundo os autores, os cimentos contendo o resíduo apresentaram desempenho mecânico superior aos cimentos comerciais, com valores de resistência até 50% maiores que os respectivos cimentos compostos comerciais. Assim, os autores afirmam que, a pozolana obtida a partir de resíduos de cerâmica vermelha apresenta-se como uma potencial alternativa de adição mineral para a produção de cimento Portland.

Souza (2017) também analisou o efeito da substituição parcial do cimento por RCV através de ensaios de resistência à compressão axial e porosidade em argamassas com teores de substituição de 15 e 25%, em massa, e com relações água/aglomerante (cimento + RCV) variando entre 0,35 e 0,55. A autora, avaliou, ainda, a pozolanicidade do material através de ensaio Fratini e de difratometria de raios-X. No ensaio Fratini, para os dois teores de substituição, o resíduo foi caracterizado como não pozolânico. Já pela análise do perfil difratométrico foi indicado discreto halo amorfo. A substituição parcial do cimento por

resíduo de cerâmica vermelha para os teores de 15 e 25% provocou uma redução da resistência à compressão das argamassas. Dessa forma, a utilização de RCV na composição do cimento Portland propiciou redução na resistência à compressão das argamassas em percentual inferior ao teor de RCV utilizado. A autora também analisou a porosidade das argamassas. No estudo, constatou-se que a redução do teor de cimento Portland resultou no aumento da porosidade das argamassas.

De forma geral, percebeu-se divergência entre os resultados obtidos na literatura, isto é, ora o RCV foi caracterizado como pozolânico ora como não-pozolânico. Tal fato ocorre devido às diferentes composições químicas, temperatura de queima e finura do resíduo que, de fato, influenciam na pozolanicidade do material. A composição das argilas utilizadas na indústria da cerâmica vermelha é realizada de forma empírica e, portanto, há diferenças de matérias-primas entre as olarias e, conseqüentemente, diferentes resíduos de cerâmica vermelha. Também não há padronização da temperatura de sinterização dos produtos de cerâmica vermelha. Dessa forma, os resíduos utilizados nas pesquisas possuem diferentes características físico-químicas que alteram a pozolanicidade. Evidencia-se, assim, a necessidade de maior estudo para investigar os efeitos causados pelas características físico-químicas sobre a reatividade do RCV.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados no trabalho, bem como os métodos empregados para cumprir o objetivo da pesquisa. Para tanto, será realizada a descrição do processo de obtenção e caracterização do RCV, e a descrição dos ensaios realizados para a avaliação das argamassas. A rotina experimental se assemelha à descrita por Souza (2017), visto ser objetivo deste trabalho a comparação com o estudo da referida autora.

3.1 Materiais

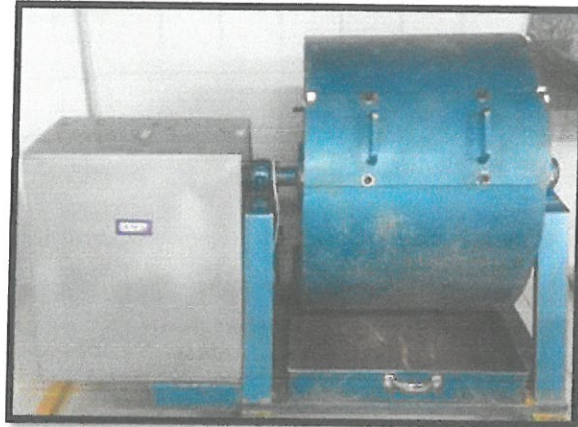
3.1.1 Cimento Portland

Para execução das argamassas, utilizou-se o cimento Portland da marca Ciplan e do tipo CP II – Z – 32, conforme classificação da NBR 11.578:1991 – Cimento Portland composto. A massa específica do cimento, determinada por meio da NBR NM 23:2001 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, foi de 3,0 g/cm³.

3.1.2 Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV)

O RCV utilizado foi obtido a partir da cominuição de rejeitos de blocos cerâmicos de vedação. O procedimento para a moagem do resíduo foi realizado por Souza (2017). Inicialmente, os blocos foram fragmentados por meio de apiloador (adensador) manual corriqueiramente utilizado em obras de construção civil. Em seguida, a fração apiloadora foi colocada em equipamento de abrasão Los Angeles da marca AMC, conforme Figura 2, com 12 esferas de aço de diâmetro de 46,66 mm e 445 gramas cada. A carga de moagem utilizada foi de 10 kg e o tempo de processamento foi de 3,5 horas. Cabe salientar que a etapa de moagem do RCV foi realizada por Souza (2017). Neste estudo foi realizado o peneiramento do RCV cominuído preliminarmente por Souza (2017).

Figura 2 – Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado para a moagem do RCV.



Fonte: A autora.

Após a moagem, o resíduo, em frações de 500 gramas, foi peneirado utilizando agitador de peneiras (Figura 3) da marca Tholz, por 10 minutos, sendo obtido, a cada peneiramento, em torno de 10% do material passante na peneira de abertura de malha de 75 μm . No presente trabalho, utilizou-se apenas o resíduo passante na peneira de abertura de malha de 75 μm , com o intuito de comparar os resultados obtidos com os resultados de Souza (2017), a qual utilizou o resíduo sem a etapa de peneiramento, ou seja, com partículas de maior dimensão. Foram colocadas moedas em cada peneira, com o intuito de facilitar a passagem das partículas nas peneiras e mitigar a colmatação devido à finura do resíduo. O aspecto do resíduo após o peneiramento é apresentado na Figura 4.

Figura 3 – Agitador de peneiras utilizado para a separação da fração de partículas com dimensão inferior a 75 μm .



Fonte: A autora.

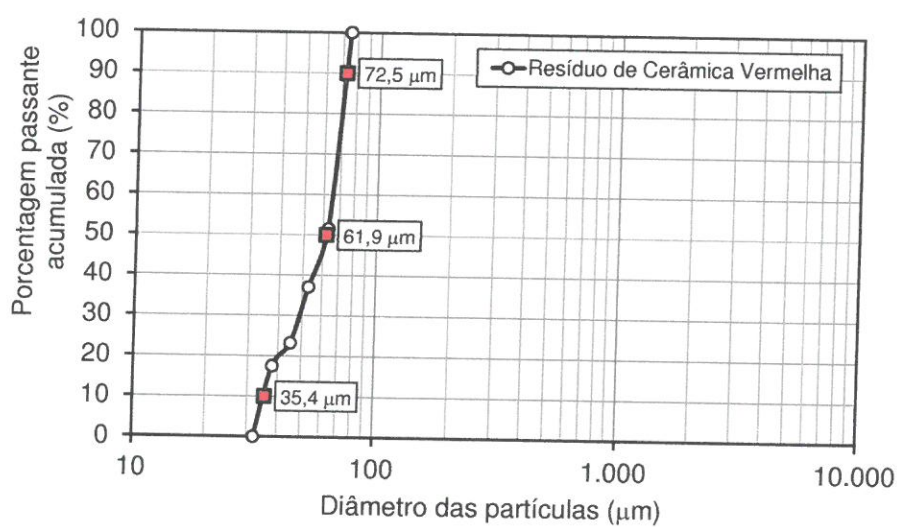
Figura 4 – Aspecto físico do RCV cominuído após o peneiramento.



Fonte: A autora.

A distribuição granulométrica do RCV é apresentada na Figura 5. A massa específica do RCV, determinada em triplicata, foi de $2,56 \text{ g/cm}^3$.

Figura 5 – Distribuição granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: A autora.

Tabela 1 – Granulometria do resíduo de cerâmica vermelha.

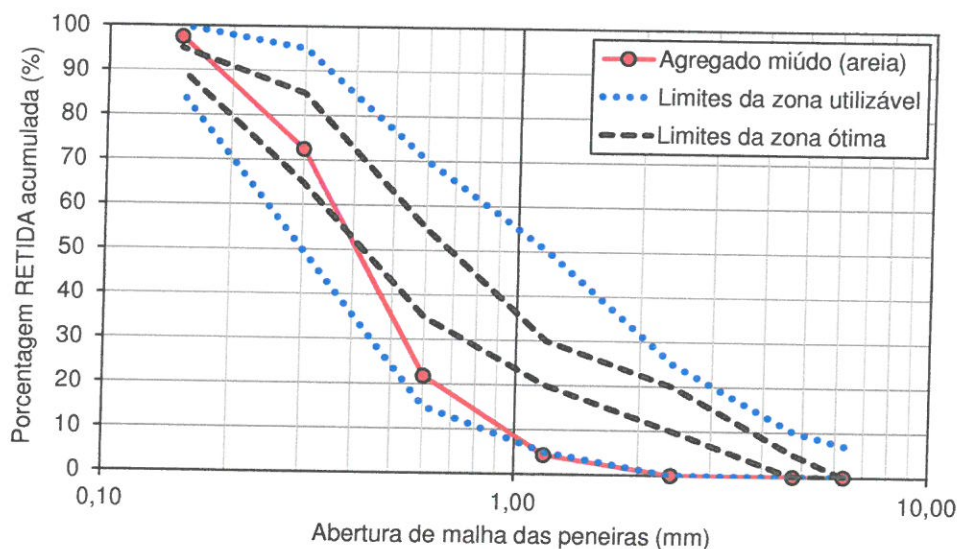
Granulometria	$D_{m\acute{a}x.}$	$D_{90,0\%}$	$D_{50,0\%}$	$D_{10,0\%}$
Diâmetro (µm)	75,0	72,5	61,9	35,4

Fonte: A autora.

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado apresenta características de areia típica de leito de rio, encontrada na região de Barreiras, BA. Para caracterização do material, foram realizados os ensaios de massa específica, conforme NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente; massa unitária, conforme NBR NM 45:2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios; e o ensaio de granulometria tendo como base a NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. A partir das duas últimas grandezas, determinou-se a porosidade granular. A massa específica da areia, determinada em duplicata, foi de $2,56 \text{ g/cm}^3$. A massa unitária no estado solto, determinada em triplicata, foi de $1,57 \text{ g/cm}^3$. A porosidade da estrutura granular é de 38,59 %. A curva granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: A autora.

Conforme pode ser observado, o agregado não atende os limites da zona utilizável determinados na NBR 7211:2011 – Agregados para concreto. O módulo de finura da areia é de 1,95 e o diâmetro máximo característico é de 1,20 mm.

3.2 Composição dos aglomerantes

Para comparação dos resultados, as composições dos aglomerantes utilizadas neste estudo foram semelhantes às de Souza (2017). Assim, realizou-se a substituição parcial do cimento nos teores de 15 e 25%, em massa, 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
Referência	100 %	---
15% RCV	85 %	15 %
25% RCV	75 %	25 %

Fonte: A autora.

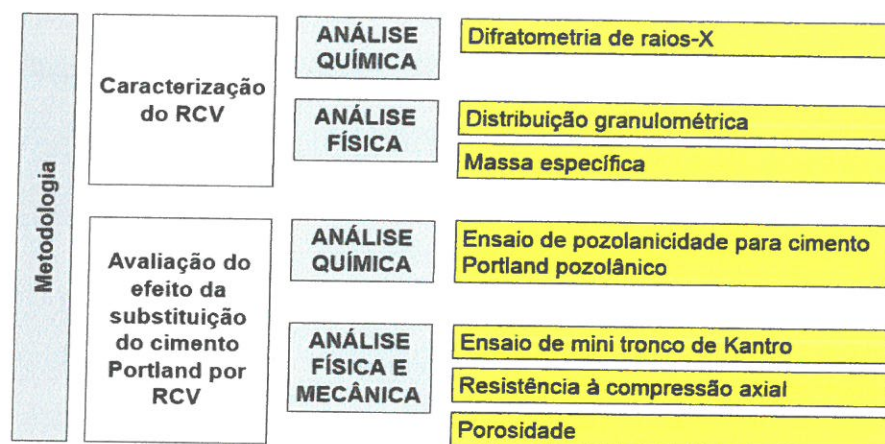
3.3 Métodos

Os procedimentos realizados no presente trabalho são apresentados sucintamente a seguir, sendo detalhados nos subitens seguintes. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, *Campus* Barreiras.

- Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico: Foi realizado com o intuito de avaliar a atividade pozolânica, comparando-se a quantidade de cal presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com a quantidade de cal que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade.
- Ensaio de mini tronco de cone Kantro: O método do mini-abatimento foi descrito por Kantro (1980) e objetivou avaliar a consistência das argamassas nos diferentes teores estudados.
- Resistência à compressão axial: o ensaio foi realizado segundo a NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1996), com o objetivo de analisar a evolução da resistência à compressão axial aos 7, 28 e 56 dias de idade, e avaliar a atividade pozolânica.
- Ensaio de porosidade: Foi realizado com o intuito de avaliar a variação do volume de vazios contido nas diferentes matrizes hidratadas estudadas aos 7, 28 e 56 dias.

A Figura 7 apresenta uma síntese dos métodos utilizados para a avaliação da reatividade do RCV e análise da influência da substituição parcial do cimento por este material sobre as propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas.

Figura 7 – Metodologia de estudo.



Fonte: A autora.

3.3.1 Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico

Este ensaio é usualmente utilizado com o intuito de verificar a atividade pozolânica de uma adição mineral através da comparação da quantidade de cal presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com a quantidade de cal que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade. O ensaio seguiu as determinações da norma NBR 5753:2016 – Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico.

O ensaio consistiu no preparo de amostras, com 15 e 25% de substituição de cimento Portland por RCV. Foram preparadas duas amostras para cada teor de substituição. As amostras, de 20 gramas cada (cimento + RCV), foram misturadas a 100 mL de água previamente aquecida a 40 °C em Erlenmeyer polimérico com tampa e, na sequência, mantidas em cura térmica, a 40 °C, até as idades de realização do ensaio (8 e 15 dias). No oitavo dia, foi retirada uma das amostras de cada teor e filtrada a vácuo. Retirou-se da solução filtrada uma alíquota para a realização de titulação e determinou-se a concentração de íons hidroxila e, posteriormente, a concentração de óxido de cálcio. O mesmo procedimento foi realizado para as amostras restantes aos 15 dias.

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 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.

3.3.2 Argamassas de cimento Portland e RCV

O presente estudo tem por objetivo analisar os efeitos sobre a resistência à compressão axial e porosidade, em argamassas, na substituição parcial do cimento Portland por RCV com granulometria inferior a 75 µm, comparando-o aos resultados obtidos por Souza (2017), sem peneiramento. Dessa forma, utilizou-se os mesmos teores de substituição, de 15 e 25% em massa, e mesmas relações água/aglomerante, de 0,35; 0,45 e 0,55, utilizadas pela autora. As proporções de mistura são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Proporções de mistura das argamassas.

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

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

Fonte: A autora

3.3.2.1 Mistura das argamassas

O procedimento de mistura foi realizado conforme o item 3.5.1.2. da NBR 7.215:1996. O misturador utilizado foi adaptado, utilizando uma furadeira convencional na qual foi acoplada uma pá de mistura utilizada em bateadeiras domésticas. A adoção deste método de mistura das argamassas ocorreu em virtude da falta de infraestrutura laboratorial da Instituição.

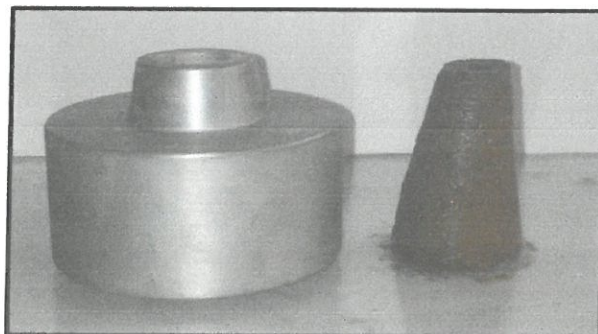
Inicialmente, toda a água de mistura foi colocada no recipiente polimérico. O material aglomerante (cimento + RCV) foi adicionado gradativamente, tendo sido homogeneizado previamente por agitação manual durante 2 minutos. A adição do aglomerante na água foi realizada por período não superior a 30 segundos. Após esse tempo, o agregado miúdo foi sendo adicionado, em parcelas, durante 30 segundos. A mistura foi realizada até a constatação visual da homogeneidade da argamassa, período esse não superior a 5 minutos.

3.3.2.2 Ensaio no mini tronco de cone de Kantro

Após a mistura das argamassas, com o intuito de analisar a consistência das mesmas, realizou-se o ensaio de mini tronco de cone de Kantro. Para comparação com o estudo de Souza (2017), o ensaio foi realizado 8 minutos a partir da mistura dos aglomerantes com a água de amassamento, visto ter sido esse o tempo utilizado pela autora para realização do ensaio.

Para a realização do ensaio é utilizado o molde tronco-cônico apresentado na Figura 8. O molde deve ser previamente lubrificado e disposto sobre uma placa de vidro também lubrificada. O tronco-cônico é então preenchido gradativamente com a argamassa, sendo compactado com auxílio de uma haste. Após o total preenchimento do cone, o molde é levantado verticalmente, o que permite o espalhamento do material cimentício. Mede-se ortogonalmente, dois diâmetros horizontais sobre o disco formado. A média destes diâmetros representa o espalhamento da argamassa e está relacionado à sua consistência. Na Figura 8 está apresentado o ensaio realizado em argamassa com substituição parcial de cimento por 25% de RCV e relação água/aglomerante de 0,35.

Figura 8 – Ensaio de espalhamento no mini tronco de cone de Kantro em argamassa com 25% de RCV e relação água/aglomerante = 0,35.



Fonte: A autora.

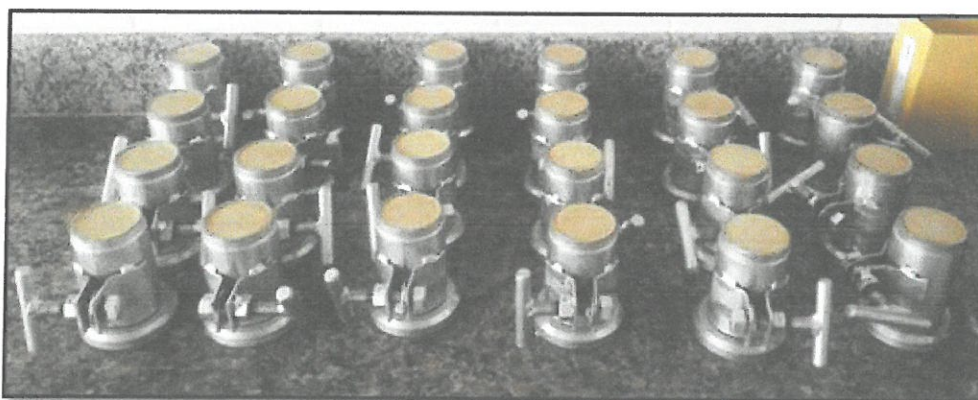
3.3.2.3 Moldagem dos corpos-de-prova

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada conforme a NBR 7215:1996, utilizando moldes cilíndricos de dimensões $\varnothing 5 \times 10$ cm, preparados previamente.

Após a realização do ensaio de mini tronco de cone de Kantro, foram lançadas nos moldes, em quatro camadas, a argamassa recém misturada. Cada camada foi compactada, utilizando soquete padrão, com 30 golpes. As argamassas foram desmoldadas após 24 horas e submetidas à cura submersa em água saturada com cal, até as idades de ensaios (7; 28 e 56 dias) de resistência à compressão axial e porosidade.

Foram moldados doze corpos-de-prova para cada uma das argamassas estudadas, sendo ensaiados quatro corpos de prova por idade (7; 28 e 56 dias). Os corpos-de-prova após a moldagem são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Corpos-de-prova de argamassa após a moldagem.



Fonte: Própria.

3.3.3 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado em prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC 200C, conforme as diretrizes da NBR 7215:1996. O equipamento é apresentado na Figura 10.

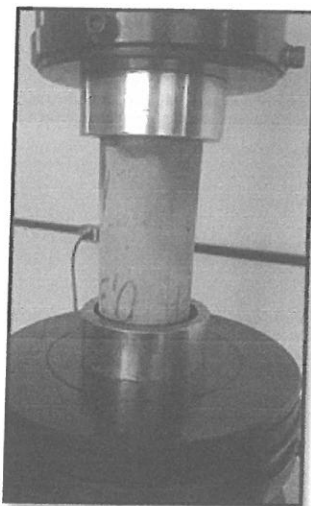
Figura 10 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: A autora.

As imperfeições das superfícies planas dos corpos-de-prova foram mitigadas utilizando-se pratos de aço com discos de neoprene de dureza *shore 70*, como apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Corpo-de-prova disposto na prensa hidráulica para ensaio de resistência à compressão.



Fonte: A autora.

3.3.4 Porosidade das argamassas

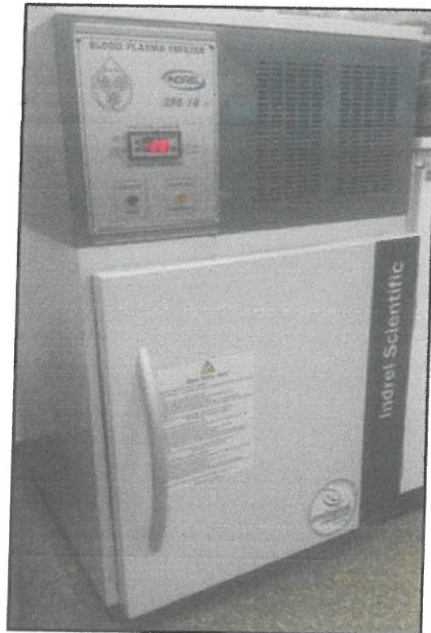
O ensaio de porosidade aparente das argamassas foi realizado em amostras extraídas dos corpos-de-prova após a realização do ensaio de resistência à compressão axial. Para tanto, retirou-se amostra da região central dos corpos-de-prova a fim de evitar a ocorrência do efeito parede. A extração da amostra foi realizada utilizando-se marreta e talhadeira. Para facilitar o processo de secagem, a dimensão de todas as amostras recolhidas foi inferior a 5,0 mm.

As amostras recém extraídas, foram submersas em água destilada para não sofrerem secagem superficial, permanecendo nesse estado por cerca de 1 hora. Na sequência, foi seca superficialmente para determinação da massa saturada superfície seca (M_{SSS}), sendo posteriormente submergida em balança hidrostática para a determinação da massa submersa (M_{SUB}).

Após a determinação da massa saturada superfície seca (M_{SSS}) e da massa submersa (M_{SUB}), a amostra foi acondicionada em recipiente polimérico e submetida à paralisação das reações por meio de congelamento e estocagem em ultrafreezer (Figura 12) com capacidade de manter a temperatura na faixa compreendida entre -27 e -30 °C. As amostras foram mantidas no ultrafreezer por, no mínimo, 24 horas para, então, serem submetidas ao processo de secagem. Esse processo foi realizado por meio de liofilização, utilizando-se equipamento da marca Terroni (Figura 13), modelo LS 3000, por um período

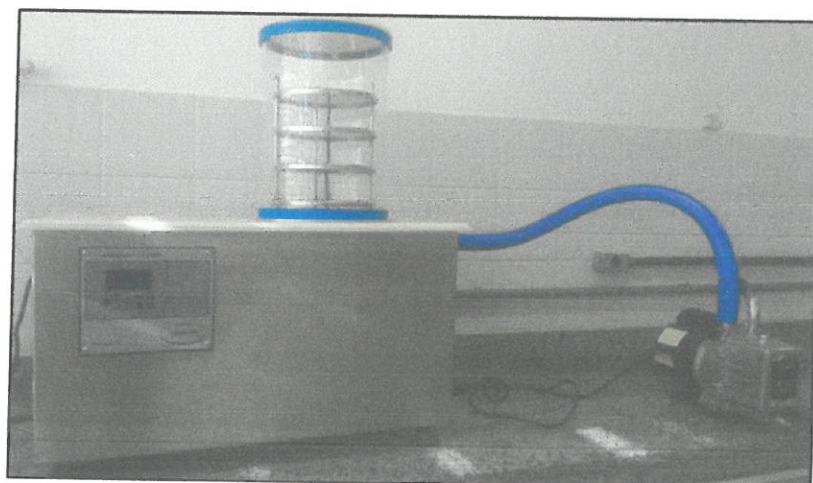
de 16 horas. A temperatura do condensador é de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a bomba de vácuo atinge a pressão de até $80\text{ }\mu\text{m Hg}$. O uso desse equipamento tem como intuito impedir a ocorrência de qualquer reação da água com as fases contidas na amostra, visto que o processo de secagem é a sublimação, ou seja, a água passa do estado sólido para o gasoso.

Figura 12 – Ultrafreezer utilizado para a paralisação das reações de hidratação das amostras de argamassas.



Fonte: A autora.

Figura 13 – Liofilizador utilizado para a secagem, por sublimação, das amostras de argamassas.



Fonte: A autora.

Após a liofilização, determinou-se a massa seca (M_s). A balança eletrônica utilizada em todas as etapas de pesagem é da marca Marte, modelo AD2000, com precisão de 0,01 g. A Figura 14 apresenta a adaptação realizada para a determinação da massa submersa das amostras por meio de aplicação de carregamento na parte inferior da célula de carga da balança.

Figura 14 – Balança hidrostática.



Fonte: A autora.

A partir dos resultados obtidos, determinou-se a porosidade aparente das amostras, utilizando-se a Equação 2, adaptado da ASTM C20 (2010).

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

Equação 2

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

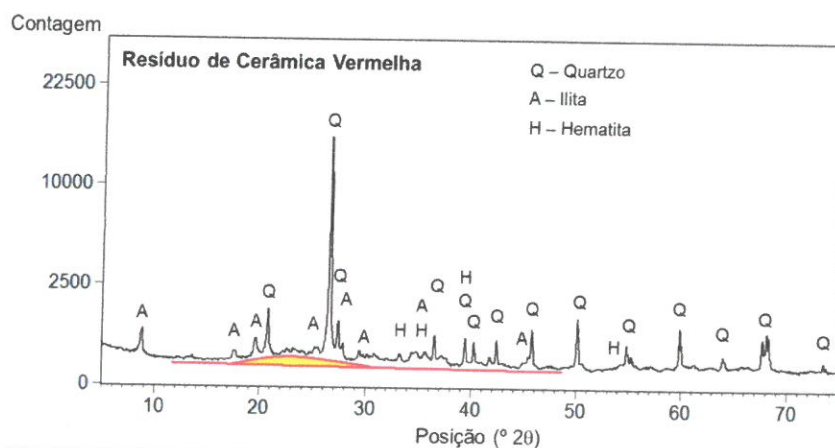
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira parte deste capítulo irá apresentar os resultados inerentes ao planejamento experimental proposto para este trabalho para, então, na segunda parte, apresentar uma análise comparativa com os resultados apresentados por Souza (2017), a qual fez uso dos mesmos materiais utilizados nesta pesquisa, exceto o RCV que, apesar de ter passado pelo mesmo beneficiamento de cominuição, não foi peneirado para a utilização da fração passante na peneira de abertura de malha de 75 μm .

4.1 Caracterização mineralógica do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV)

A presença de fração amorfa na composição do RCV foi identificada por difratometria de raios-X (DRX), a partir da existência de halo característica de estrutura amorfa no perfil difratométrico. A identificação das fases mineralógicas do RCV foi realizada por meio de análise comparativa com as fichas do International Center of Diffraction Data (ICDD). Na Figura 15 é apresentado o perfil difratométrico do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). Cabe salientar que o difratograma apresentado refere-se à amostra de RCV previamente ao peneiramento. A amostra peneirada ($< 75 \mu\text{m}$) não foi submetida ao ensaio de difratometria de raios-X em decorrência da não disponibilidade do equipamento (danificado) durante o período de tempo de realização deste trabalho.

Figura 15 – Perfil difratométrico do Resíduo de Cerâmica Vermelha.



Fonte: A autora.

Foram identificadas as seguintes fases cristalinas: quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e illita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). A presença de discreto halo amorfo na região destacada no difratograma atribui potencialidade reativa ao RCV, embora este resultado, por si só, não ser suficiente para atribuir reatividade mínima para a classificação como adição mineral pozolânica.

4.2 Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico – Ensaio Fratini

No ensaio Fratini avaliou-se o potencial reativo do RCV nos teores de 15 e 25% em substituição ao cimento Portland do tipo CP II - Z. Na Tabela 4 são apresentadas as concentrações de hidroxila e cal nas idades de 8 e 15 dias.

Tabela 4 – Resultados do ensaio Fratini, aos 8 e 15 dias de idade, das composições aglomerantes contendo RCV.

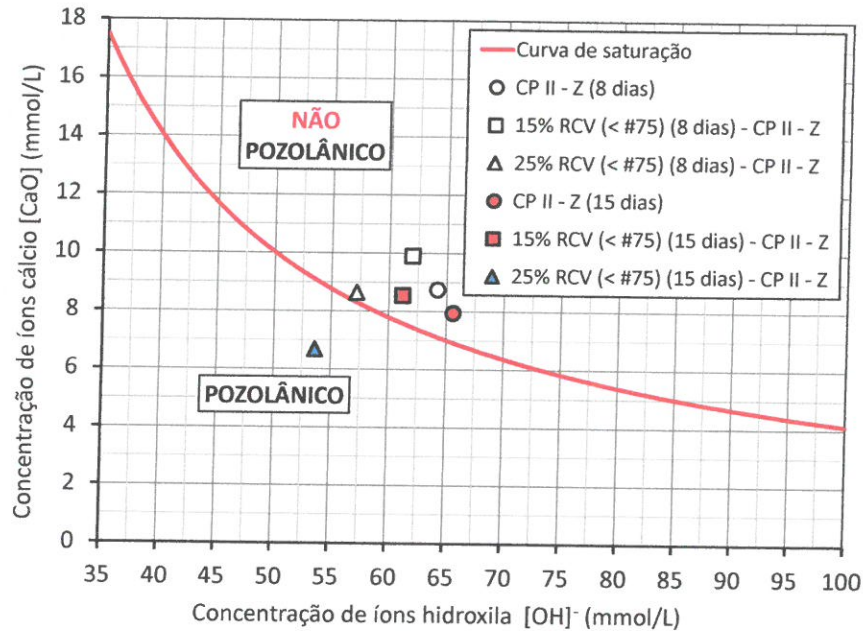
Aglomerantes	8 dias			15 dias		
	Concentração (mmol/L)		Resultado	Concentração (mmol/L)		Resultado
	[OH] ⁻	[CaO]		[OH] ⁻	[CaO]	
100% CP II - Z	64,20	8,73	Não pozolânico	65,60	7,93	Não pozolânico
85% CP II - Z + 15% RCV	62,00	9,89	Não pozolânico	61,20	8,53	Não pozolânico
75% CP II-Z + 25% RCV	57,20	8,64	Não pozolânico	53,60	6,68	Pozolânico

Fonte: A autora.

A representação gráfica dos resultados do ensaio Fratini, aos 8 e 15 dias, é apresentada na Figura 16. Os resultados situados abaixo da curva de saturação indicam caráter pozolânico do cimento ensaiado. Aos 8 dias de idade, todos os aglomerantes foram classificados como não pozolânicos. Cabe destacar que o cimento utilizado neste trabalho, do tipo CP II – Z, pode conter em sua composição um teor de pozolana até 14%. Como esta informação não estava disponível, pode-se atribuir, excetuando-se o teor de fíler calcário que também compõe o cimento, que o teor máximo de adição mineral potencialmente ativa variou entre 29% (pozolana em teor teórico máximo de 14% + 15% de RCV) e 39%

(pozolana em teor teórico máximo de 14% + 25% de RCV). Nesta situação, em caso de classificação da mistura como pozolânica, pode-se atribuir a denominação de cimento Portland pozolânico do tipo CP IV à composição contendo RCV.

Figura 16 – Resultados do ensaio Fratini para o cimento CP II – Z, 15% RCV e 25% RCV.



Fonte: A autora.

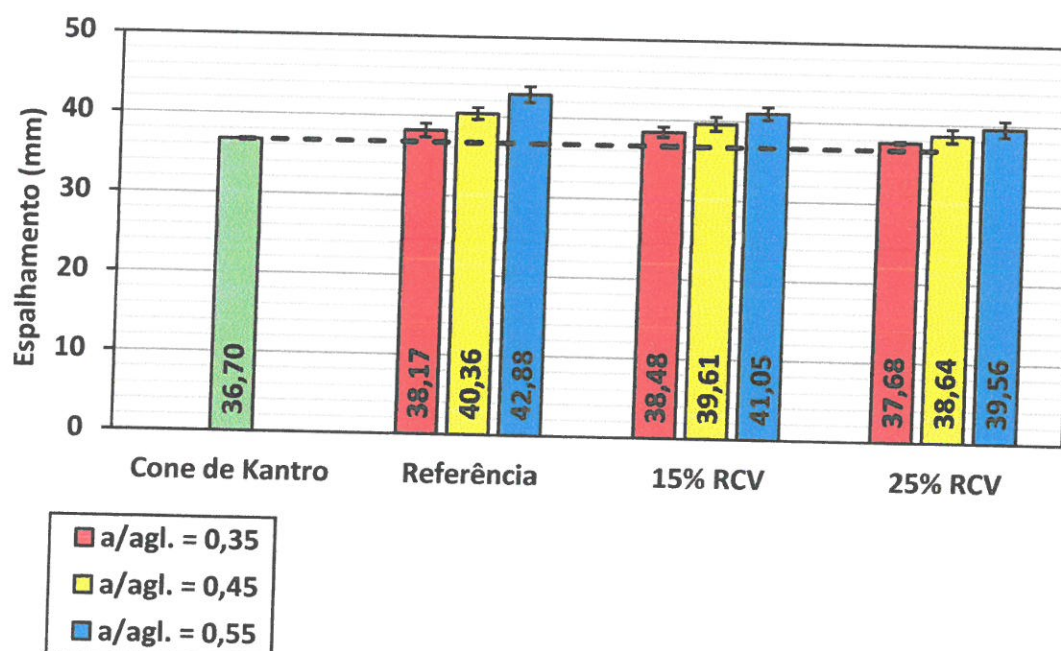
A realização do ensaio na idade de 15 dias, conforme a recomendação metodológica do ensaio Fratini, visa avaliar após maior intervalo de tempo de reação se a adição mineral testada possui reatividade suficiente para atribuir caráter pozolânico ao cimento. O não cumprimento da exigência aos 8 dias indica que a adição é praticamente inerte ou que a taxa de reação adição é baixa, ou seja, a reação pozolânica ocorre lentamente. Diante desta possibilidade, e em virtude de todos os resultados aos 8 dias atribuírem caráter não pozolânico aos cimentos testados, foi realizado o ensaio aos 15 dias. Nesta idade foi constatado que a composição aglomerante com 75% de cimento e 25% de RCV possui caráter pozolânico, o que permite atribuir baixa reatividade ao RCV, de tal forma que sua constatação só foi possível quando da sua utilização no teor de substituição de 25%.

4.3 Ensaio de mini tronco de cone de Kantro

Segundo Silva *et al.* (2005), o comportamento da argamassa no estado fresco é medido indiretamente através da sua consistência. Para analisar essa propriedade, foi realizado o ensaio de espalhamento no mini tronco de cone de Kantro nas argamassas, com o intuito de comparar os resultados obtidos aos de Souza (2017) e, sobretudo, avaliar a influência da distribuição granulométrica do RCV sobre o comportamento reológico das diferentes misturas de base cimentícia.

Transcorridos 8 minutos do início da mistura do cimento à água foi realizado o ensaio de espalhamento, determinando-se duas medidas ortogonais do diâmetro final. O resultado do ensaio representa a média dos diâmetros e foi comparado com o diâmetro da base do molde, o qual é de 36,70 mm. Os resultados de espalhamento das diferentes argamassas estudadas são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Espalhamento das argamassas determinado por meio do ensaio no mini tronco de cone de Kantro.



Fonte: A autora.

De maneira geral, observou-se um discreto aumento no espalhamento das argamassas em função do aumento da relação água/aglomerantes. O comportamento das amostras com substituição foi similar ao comportamento das argamassas de referência,

havendo menor espalhamento quanto maior foi o teor de substituição. O menor espalhamento foi de 37,68 mm na argamassa contendo 25% de RCV e com relação água/aglomerante = 0,35. O maior espalhamento observado foi de 42,88 mm na referência misturada na relação água/aglomerante = 0,55. Portanto, a incorporação de RCV na composição do material aglomerante, independentemente do teor utilizado, não impactou significativamente no espalhamento das argamassas.

4.4 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi avaliada nas idades de 7, 28 e 56 dias. A determinação da resistência em cada idade foi realizada por meio da média aritmética dos resultados obtidos no ensaio de, no mínimo, três corpos-de-prova. Esporadicamente algum resultado do ensaio de resistência à compressão foi descartado em virtude da grande dispersão em relação aos demais corpos-de-prova. O coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão, em nenhum caso, excedeu os 10%. A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão das diferentes argamassas em função das relações água/aglomerantes utilizadas e das idades de ensaio.

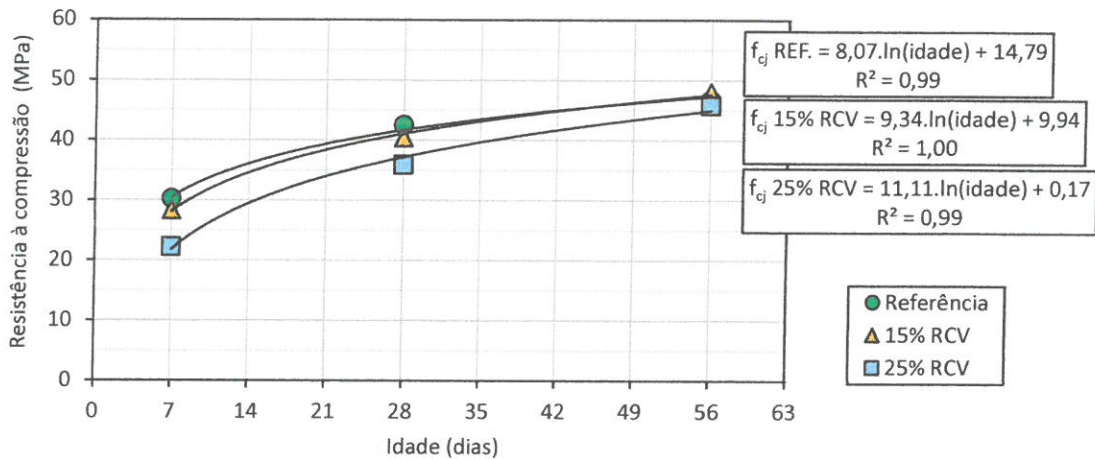
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.

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	0,35	30,2	1,63	42,6	1,89	46,7	0,51
15 % RCV		28,3	1,83	40,4	0,66	48,0	1,58
25 % RCV		22,2	0,83	35,9	0,63	45,8	1,97
Referência	0,45	21,6	0,92	32,2	0,89	35,2	0,88
15 % RCV		17,2	0,96	27,9	2,09	31,8	1,59
25 % RCV		11,4	0,91	20,3	0,78	29,4	1,21
Referência	0,55	14,9	0,37	24,4	1,13	26,4	0,88
15 % RCV		11,0	0,65	18,9	0,40	23,7	0,53
25 % RCV		5,3	0,38	14,0	0,55	20,9	0,43

Fonte: A autora.

Na Figura 18 são apresentadas as curvas de evolução de resistência à compressão das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,35.

Figura 18 – Evolução da resistência à compressão axial das argamassas estudadas na relação água/aglomerantes = 0,35.



Fonte: A autora.

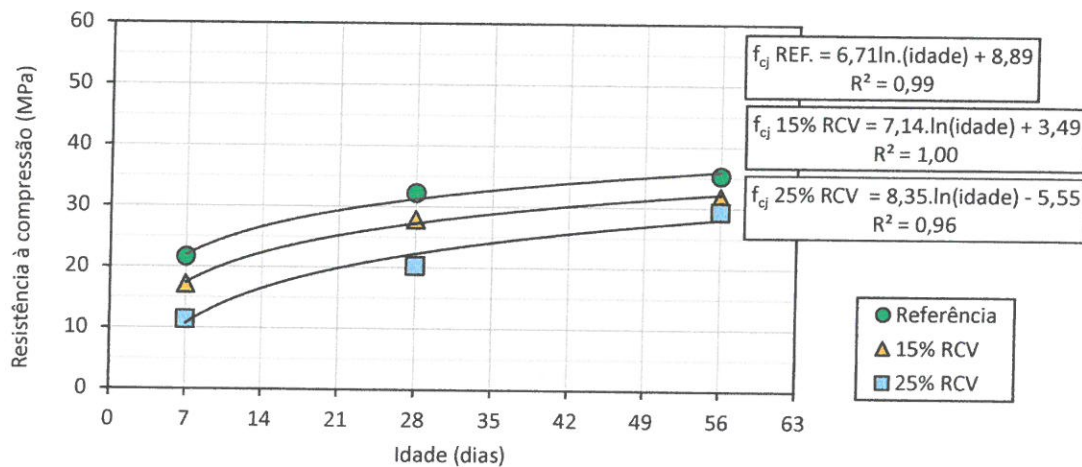
As resistências à compressão da argamassa de referência, amassada na relação água/aglomerante = 0,35, foram de 30,2; 42,6 e 46,7 MPa para as idades de 7; 28 e 56 dias, respectivamente. A resistência à compressão aos 28 dias, ao ser tomada como referência (100%), permite inferir o percentual de resistência à compressão atingido aos 7 e 56 dias de idade. Na idade de 7 dias, a resistência à compressão representou 71% do valor de referência, aos 28 dias. Já na idade mais avançada (56 dias), a resistência à compressão atingida foi de 110% em comparação à idade de 28 dias. A substituição parcial do cimento por RCV, no teor de 15%, para a relação água/aglomerante = 0,35, causou pequena redução na resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, com percentuais de 6% e 5%, respectivamente, em comparação à argamassa de referência. Na idade de 56 dias, houve comportamento inverso, ou seja, a argamassa contendo 15% de RCV apresentou resistência à compressão 3% maior que a referência. Portanto, para a relação água/aglomerante = 0,35, a utilização de RCV em teor de 15% praticamente não impactou na resistência à compressão da argamassa, haja vista esta ser similar à observada na referência, desde que a avaliação seja realizada em idades superiores a 56 dias.

No teor de 25% de RCV, para a relação água/aglomerante = 0,35, também foi observada redução na resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias. As reduções

nestas idades, em comparação à referência, foram de 26% e 16%, respectivamente. Aos 56 dias de idade, a redução da resistência foi de apenas 2%. A partir destes resultados, fica evidente que a redução na resistência à compressão decorrente da utilização do RCV em teor de 25% foi gradativamente sendo extinta, de tal forma que, aos 56 dias, a resistência à compressão foi praticamente a mesma observada na argamassa de referência.

As curvas evolutivas de resistência à compressão das argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,45 são apresentadas na Figura 19. De forma geral, observa-se comportamento evolutivo distinto em comparação às curvas referentes às argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,35. Fica evidente que há redução da resistência à compressão ao longo do tempo, inclusive para a idade de 56 dias.

Figura 19 – Evolução da resistência à compressão axial das argamassas estudadas na relação água/aglomerantes = 0,45.



Fonte: A autora.

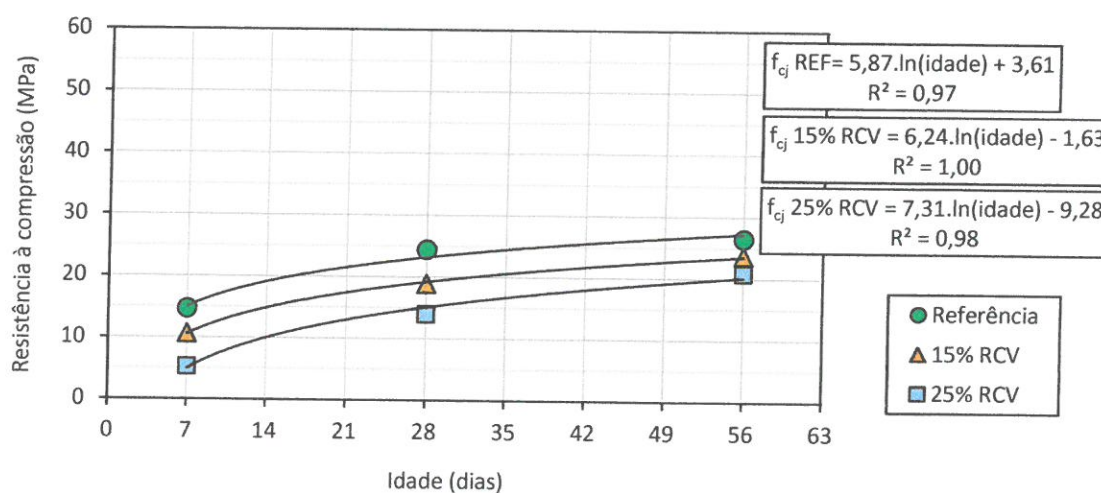
A argamassa de referência apresentou valores de resistência à compressão de 21,6; 32,2 e 35,2 MPa para as idades de 7; 28 e 56 dias, respectivamente. Em relação a idade de 28 dias, a resistência à compressão aos 7 dias representa um percentual de 67% e, aos 56 dias, 109%. Estes valores são similares aos observados na relação água/aglomerantes = 0,35. Portanto, a evolução da resistência à compressão apresentou comportamento similar para as relações água/aglomerantes 0,35 e 0,45.

A argamassa contendo 15% de RCV, amassada na relação água/aglomerantes = 0,45, apresentou redução na resistência à compressão, aos 7 dias, de 21% em comparação à argamassa de referência. Esta redução passou a ser de 13% aos 28 dias e de 10% aos 56

dias. De fato, a redução na resistência à compressão se manteve ao longo do período estudado, porém esta redução foi reduzida gradativamente com o tempo. Isto é um indício de que o RCV apresenta baixa reatividade, o que demanda tempo para que os produtos hidratados formados por atividade pozolânica exerçam influência no comportamento mecânico da argamassa. No teor de 25%, a redução aos 7 dias foi significativa, pois a resistência à compressão atingiu apenas 53% do valor da argamassa de referência, ou seja, ocorreu um decréscimo de 57%. Na idade de 28 dias, a redução passou a ser de 37% e, por fim, aos 56 dias, a resistência à compressão foi minorada em 17%. Na relação água/aglomerantes = 0,45, a redução resistência à compressão, aos 56 dias, tanto para 15% como para 25% de RCV, foi menor que o teor de substituição parcial ao cimento, sendo esta redução, na média, representada pelo valor percentual de 68% do teor de RCV utilizado.

As evoluções das resistências à compressão das diferentes argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,55 são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Evolução da resistência à compressão axial das argamassas estudadas na relação água/aglomerantes = 0,55.



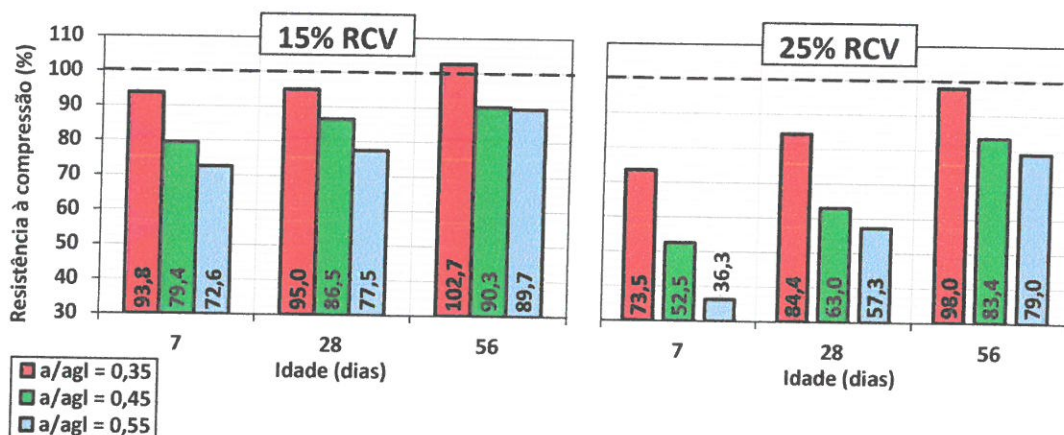
Fonte: A autora.

A argamassa de referência executada com relação água/aglomerantes = 0,55 apresentou valores de resistência à compressão de 14,6; 24,4 e 26,4 MPa, aos 7; 28 e 56 dias, respectivamente. O valor percentual da resistência à compressão, aos 7 dias, em comparação ao valor aos 28 dias, foi de 60% e, aos 56 dias, foi de 108%. No teor de 15% de

RCV, a redução na resistência à compressão, aos 7 dias, foi de 27% em relação à argamassa de referência, na mesma idade. Esta redução foi reduzida gradualmente ao longo do tempo, atingindo 23% aos 28 dias e 10% aos 56 dias. Para o teor de 25%, a redução na resistência foi de 64% aos 7 dias, a qual foi reduzida ao longo do tempo, atingindo 43% aos 28 dias e 21% aos 56 dias. A redução na resistência à compressão foi, aos 56 dias, tanto para 15% como para 25% de RCV, inferior ao teor de substituição parcial do cimento. Para 15% de RCV, a redução na resistência à compressão representou, aos 56 dias, 68% do teor utilizado. Para 25% de RCV, esta redução representou 84% do teor de substituição parcial do cimento.

A análise geral relacionada à redução da resistência à compressão quando da utilização de RCV, nos teores de 15% e 25% em substituição parcial ao cimento Portland, em comparação às respectivas argamassas de referência é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Evolução percentual da resistência à compressão axial das argamassas com substituição parcial do cimento por RCV em relação às respectivas argamassas de referência.



Fonte: A autora.

A análise dos resultados apresentados na Figura 20 evidencia que a influência na resistência à compressão, quando da utilização de RCV em substituição parcial ao cimento Portland, depende do teor de substituição e da relação água/aglomerantes. No tocante ao teor de substituição, ficou evidente que a utilização de 25% de RCV causou mais impacto na redução da resistência à compressão nas primeiras idades, ou seja, a resistência foi reduzida nas idades de 7 e 28 dias em comparação as respectivas argamassas de referência. Na idade de 56 dias, a redução na resistência à compressão foi da ordem de 20% em relação

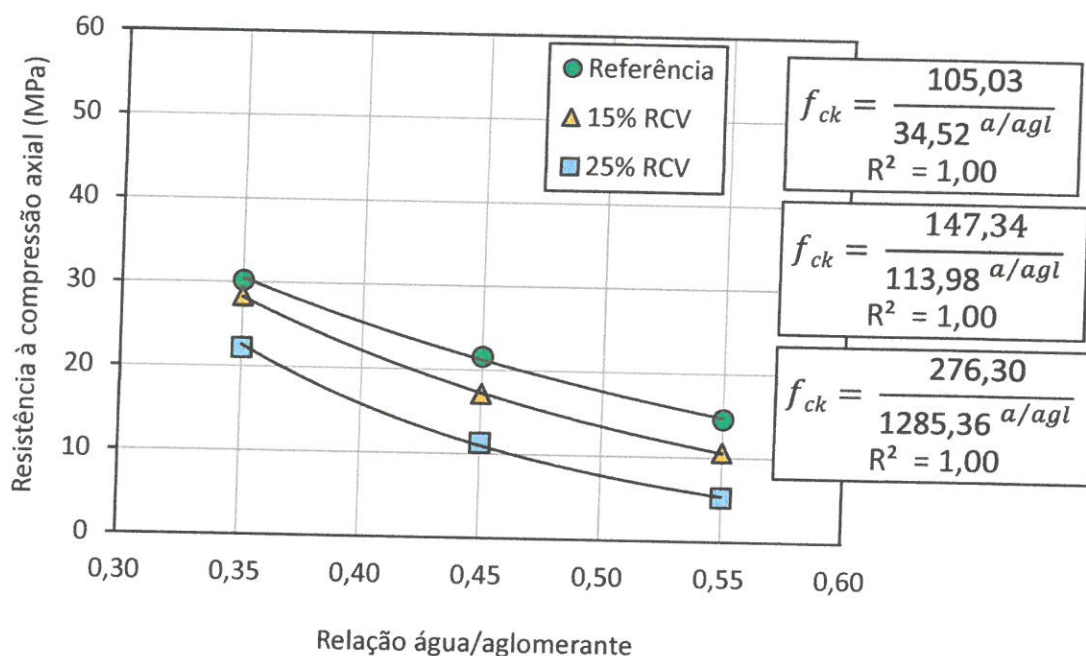
à referência, exceto quando da utilização de relação água/aglomerantes = 0,35, situação onde houve equiparação da resistência à compressão com a referência. Para o teor de 15%, também houve redução na resistência à compressão nas primeiras idades (7 e 28 dias), a qual foi gradativamente sendo diminuída ao longo do tempo, até resultar, em média, em uma redução de 10% para as maiores relações água/aglomerantes (0,45 e 0,55). A menor relação água/aglomerantes (0,35), apesar da redução na resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, propiciou valor similar de resistência à compressão aos 56 dias quando comparado ao da argamassa de referência.

No que se refere à relação água/aglomerantes, apesar da variação da redução na resistência à compressão em comparação às respectivas argamassas de referência, ficou evidente que, para as relações água/aglomerantes 0,45 e 0,55, a redução na resistência à compressão foi gradativamente sendo reduzida ao longo do tempo, porém a resistência à compressão manteve-se abaixo das respectivas referências na idade de 56 dias. O comportamento observado na relação água/aglomerante 0,35 difere das demais, ou seja, a redução na resistência à compressão aos 7 e 28 dias foi extinta aos 56 dias. Portanto, este comportamento pode vir a ocorrer nas demais relações água/aglomerantes em idades mais avançadas, o que demandaria maior tempo de acompanhamento da evolução da resistência à compressão das argamassas. Por outro lado, ficou evidente que a taxa de reação do RCV é baixa e, portanto, seus efeitos demandam tempos relativamente longos para a constatação de sua influência na resistência a compressão de argamassas amassadas com relação água/aglomerantes superiores a 0,45.

4.5 Resistência à compressão *versus* relação água/aglomerantes – Curvas de Abrams

As variações da resistência à compressão, aos 7 dias, em função das relações água/aglomerantes de mistura das diferentes composições ligantes são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 – Curvas de Abrams das argamassas na idade de 7 dias.

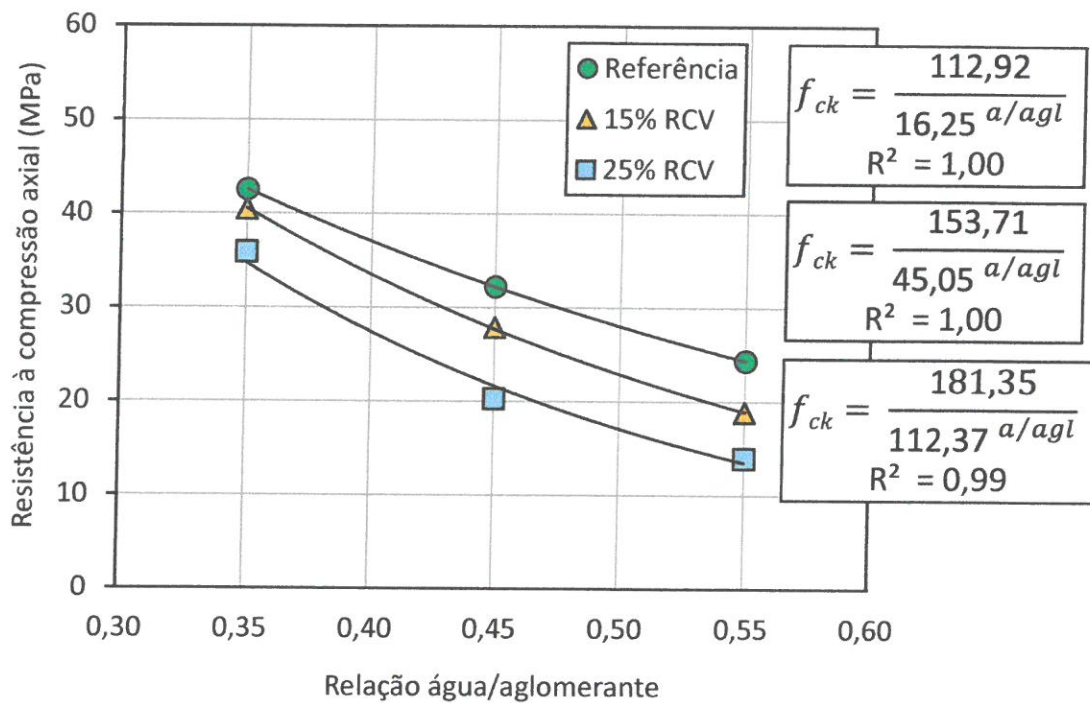


Fonte: A autora.

As curvas evidenciam que há, de fato, redução na resistência à compressão em relação à argamassa de referência quando da substituição parcial do cimento Portland por RCV. Esta redução é mais significativa para teores crescentes de incorporação de RCV na composição do material cimentício. O comportamento das curvas evidencia uma leve tendência de atenuação na redução da resistência à compressão das argamassas contendo RCV conforme há a diminuição da relação água/aglomerantes de mistura. De fato, para a obtenção de mesma resistência à compressão entre as argamassas, nesta idade, há que se reduzir a relação água/aglomerantes das argamassas contendo RCV. Esta redução deve ser maior para teores crescentes de RCV na composição do material aglomerante.

As curvas de Abrams das diferentes argamassas estudadas, aos 28 dias de idade, são apresentadas na Figura 23.

Figura 23 – Curvas de Abrams das argamassas na idade de 28 dias.



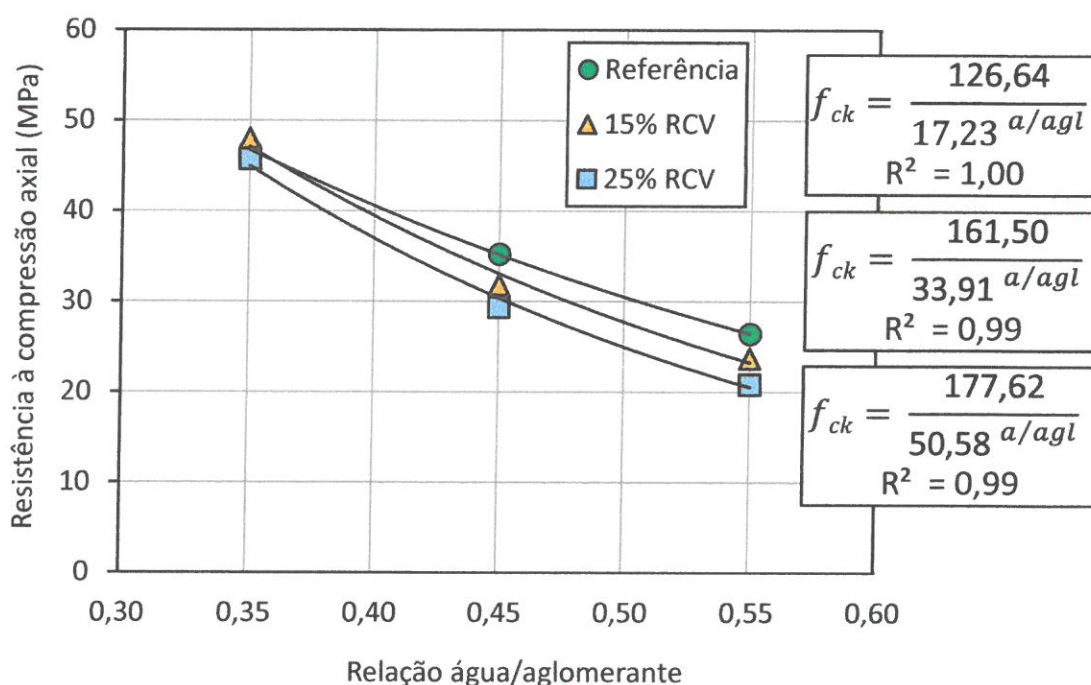
Fonte: A autora.

Os coeficientes de determinação (R^2) das curvas evidenciam a consistência dos resultados experimentais obtidos e, desta forma, é possível analisar a influência da relação água/aglomerantes sobre a resistência à compressão das diferentes composições cimentícias com maior propriedade. A idade de 28 dias, normalmente utilizada com mais frequência no controle tecnológico da resistência à compressão dos materiais de base cimentícia, evidencia que a utilização de RCV na substituição ao cimento Portland reduz, com maior intensidade, a resistência à compressão em comparação às respectivas referências quanto maior a relação água/aglomerantes. Desta forma, em virtude da necessidade de redução da relação água/aglomerantes para compensar a menor resistência à compressão, haverá aumento no consumo de aglomerantes quando da utilização de RCV, o que impacta no custo unitário da argamassa, ou seja, a argamassa apresentará maior valor agregado. No teor de 15% de RCV, para relações água/aglomerantes menores que 0,45, quanto maior a resistência à compressão, menor será a necessidade de redução da relação água/aglomerantes e, conseqüentemente, há potencialização da viabilidade econômica referente à utilização do RCV. Para a relação água/aglomerantes 0,35, a argamassa contendo 15% de RCV, atingirá, aos 28 dias, uma resistência à compressão média de 40,5 MPa (valor obtido pela curva de Abrams). A

argamassa de referência deveria ser misturada com relação água/aglomerantes = 0,37, ou seja, praticamente não ocorrerá alteração no consumo de aglomerantes. Este comportamento não ocorrerá para o teor de 25%, ou seja, a equiparação na resistência à compressão com a argamassa de referência demandará maior consumo de aglomerantes e, conseqüentemente, o custo unitário será maior.

As relações entre a resistência à compressão e a relação água/aglomerantes das diferentes argamassas, aos 56 dias de idade, são apresentadas na Figura 24.

Figura 24 – Curvas de Abrams das argamassas na idade de 56 dias.



Fonte: A autora.

Na idade de 56 dias ficou evidente que houve minoração da redução da resistência à compressão das argamassas contendo RCV em relação às respectivas argamassas de referência. De fato, para a relações água/aglomerantes entre 0,45 e 0,35 é necessária considerável redução na massa de água em relação à massa de cimento nas argamassas contendo RCV para que ocorra a aproximação da resistência à compressão com a argamassa de referência. Por outro lado, para relações água/cimento menores que 0,45 até 0,35, a redução na relação água/aglomerantes tende a ser cada vez menor, de tal forma que, ao atingir o valor de 0,35, há equiparação da resistência à compressão entre as argamassas. Tal comportamento evidencia que a evolução da resistência à compressão é

mais lenta quando da presença de RCV na composição do material cimentício e, desta forma, deve-se disponibilizar maior intervalo de tempo para que as reações decorrentes da interação do pó cerâmico com a portlandita ocorram de forma perceptível. *A priori* para relações água/aglomerantes maiores que 0,35, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, há que se considerar idades superiores a 56 dias para a averiguação da eficácia do RCV como possível adição ativa.

4.6 Porosidade das argamassas

Os valores decorrentes do ensaio de porosidade das argamassas, nas diferentes idades estudadas, são apresentados na Tabela 6.

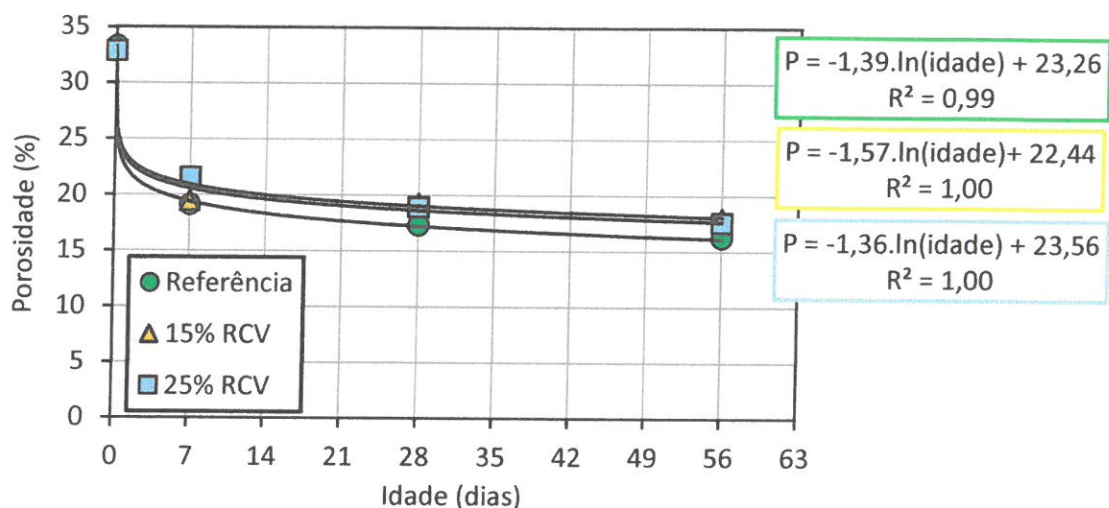
Tabela 6 – Porosidade das argamassas

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

Fonte: A autora.

As curvas de evolução da porosidade das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,35 são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Evolução da porosidade das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,35.

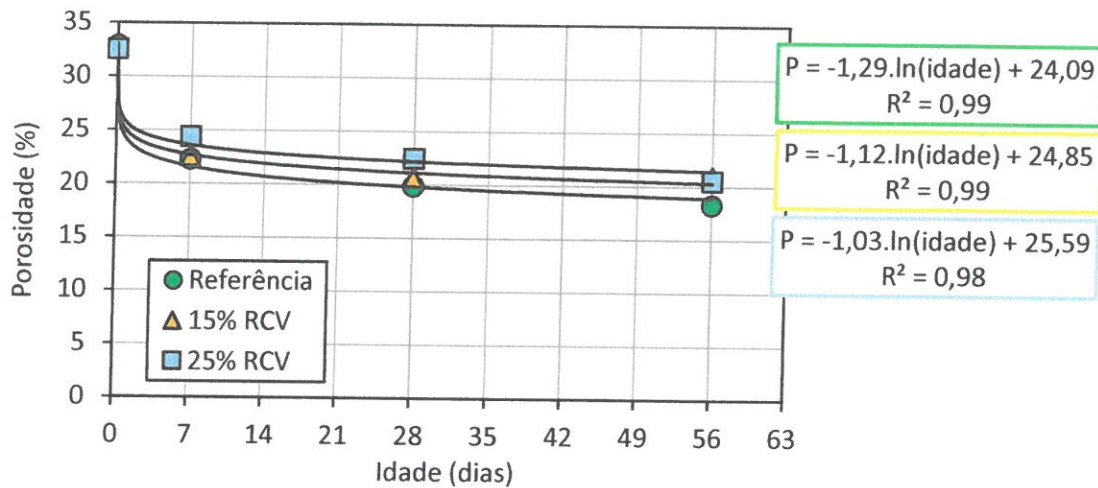


Fonte: A autora.

A porosidade inicial teórica das argamassas são praticamente as mesmas, com singela redução nas argamassas contendo RCV em comparação à argamassa de referência. Assim sendo, pode-se afirmar que o volume de vazios inicial é praticamente o mesmo e este vai sendo reduzido ao longo do tempo em decorrência das reações de hidratação do sistema. A argamassa de referência, de porosidade inicial teórica de 33,3%, apresentou volume de vazios médio de 19,1% aos 7 dias. A partir desta idade, a porosidade reduz gradativamente, porém em menor intensidade, atingindo 17,3% aos 28 dias e 16,3% aos 56 dias. A substituição parcial do cimento por 15% de RCV propiciou, de modo geral, aumento da porosidade em relação à referência, de tal forma que a porosidade aos 7 dias foi de 19,4%. Já aos 28 dias, este valor passou a ser de 19,3%, atingindo 18,0% aos 56 dias. No teor de 25% foi observado comportamento similar aos resultados referentes à substituição de 15%, exceto na idade de 7 dias, onde a porosidade foi de 21,6%. Assim sendo, a porosidade praticamente não foi alterada quando do aumento do teor de RCV, apesar da ocorrência de diferença de resistência à compressão entre estas argamassas nas idades de 7 e 28 dias. Na idade de 56 dias, a resistência à compressão foi praticamente a mesma. Cabe destacar que, apesar da menor porosidade da argamassa de referência, tanto esta quanto as argamassas contendo RCV, nos diferentes teores estudados, apresentaram resistência à compressão similar. Portanto, a porosidade por si só não é fator determinante da resistência à compressão da matriz hidratada.

Na Figura 26 estão apresentadas as curvas de porosidade ao longo do tempo das argamassas amassadas na relação água/aglomerantes = 0,45.

Figura 26 – Evolução da porosidade das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,45.

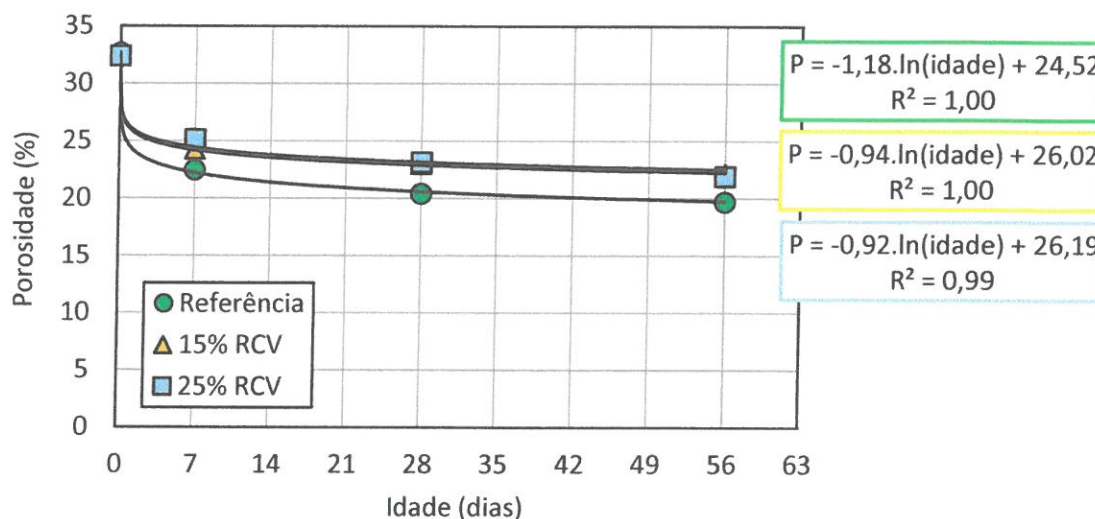


Fonte: A autora.

Assim como na relação água/aglomerantes = 0,35, o aumento desta relação para 0,45 resultou em valores crescentes de porosidade quanto maior o teor de RCV na mistura. A porosidade inicial teórica, praticamente a mesma para todas as argamassas, ao ser tomada como referência, evidencia que a referência sofreu maior redução no volume de vazios ao longo do tempo quando comparada às argamassas contendo RCV. A argamassa de referência atingiu, aos 56 dias, 18,3% de porosidade, enquanto a argamassa contendo 15% de RCV atingiu 20,9%. No teor de 25%, a porosidade aos 56 dias foi de 20,6%. De fato, a argamassa de referência, de menor porosidade, apresentou a maior resistência à compressão, enquanto que as argamassas contendo RCV, de porosidade bastante similar aos 56 dias, apresentaram resistência à compressão também similares.

Na Figura 27 são apresentadas as curvas de evolução da porosidade das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,55.

Figura 27 – Evolução da porosidade das argamassas misturadas na relação água/aglomerantes = 0,55.



Fonte: A autora.

O comportamento observado nas relações água/aglomerantes anteriormente apresentadas se repetiu para a relação água/aglomerantes 0,55, ou seja, as argamassas contendo RCV apresentaram porosidade superior à argamassa de referência, independentemente da idade de análise. Diante do comportamento relacionado à porosidade das argamassas nas diferentes relações água/aglomerantes, pode-se afirmar que a redução no volume de vazios ao longo do tempo é dependente do teor de cimento contido na argamassa, ou seja, quão maior o teor de cimento, maior a redução da porosidade.

O caso particular relacionado à equiparação da resistência à compressão entre as argamassas misturas na relação água/aglomerantes = 0,35, onde as mesmas apresentaram porosidades distintas, há que se analisar de forma mais minuciosa a microestrutura das matrizes hidratadas a fim de se obter subsídios técnico-científicos que justifiquem tal comportamento. Esta análise requer equipamentos de maior valor agregado que não estão disponíveis na Instituição de realização deste trabalho. Assim sendo, esta lacuna pode ser preenchida em trabalhos futuros, desde que haja a viabilidade de uso de equipamentos específicos para o estudo da microestrutura.

4.7 Relação resistência à compressão versus porosidade

A bibliografia pertinente à microestrutura de materiais de base cimentícia indica que a resistência à compressão está inversamente relacionada à porosidade da matriz hidratada, ou seja, quanto maior a porosidade, menor a resistência à compressão. Esta relação foi apresentada por Metha e Monteiro (1994). O modelo matemático proposto pelos autores consta da Equação 3:

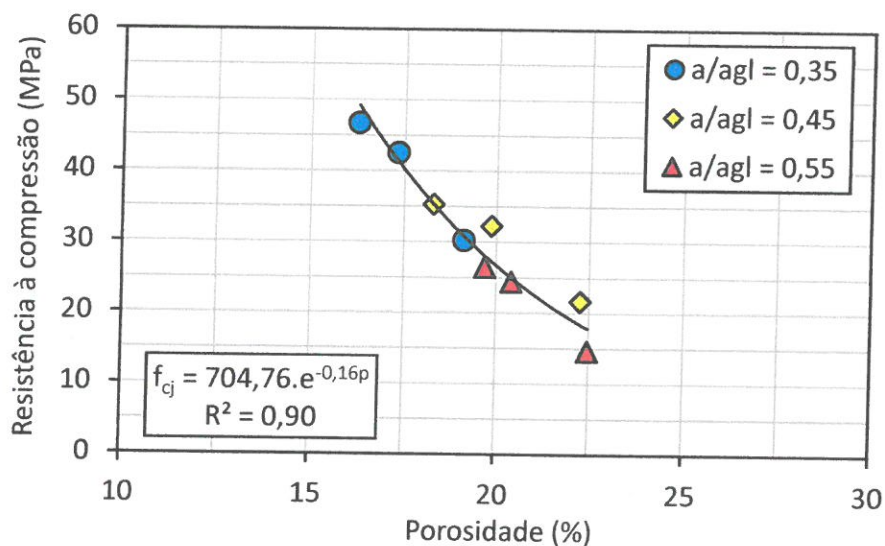
$$S = S_o e^{-kp} \quad \text{Equação 3}$$

S – Resistência à compressão (MPa);
 S_o – Resistência à compressão para porosidade igual a zero (MPa);
 p – Porosidade (%);
 k – Constante.

O modelo proposto pelos autores foi aplicado nos resultados deste trabalho, obtendo-se coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,90 para todas as curvas de tendência, o que indica uma boa consistência dos dados obtidos experimentalmente.

Na Figura 28 é apresentada a curva que relaciona a resistência à compressão em função da porosidade para a argamassa de referência.

Figura 28 – Relação resistência à compressão versus porosidade da argamassa de referência.



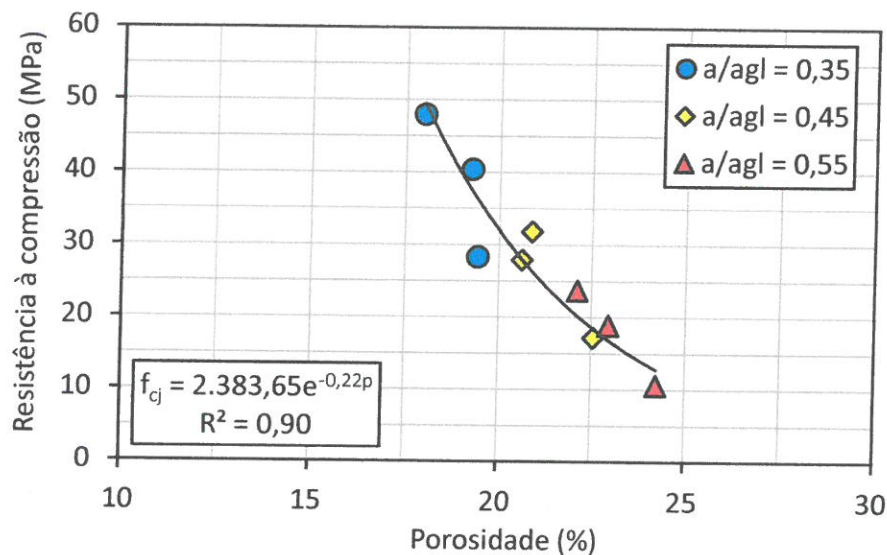
Fonte: A autora.

Os resultados experimentais extremos, representados, à esquerda, por uma porosidade de 16,3% e resistência à compressão de 46,7 MPa e, à direita, por 22,5% e 14,6

MPa, indicam que a redução da porosidade em 6,2% (22,5% - 16,3%) implica em um aumento de resistência à compressão de 32,1 MPa (46,7 MPa – 14,6 MPa). A partir destes resultados obtém-se o índice de 5,2 MPa/unidade de porosidade reduzida. Este índice será comparado aos equivalentes obtidos para as argamassas contendo RCV na composição.

Na Figura 29 consta a curva resistência à compressão *versus* porosidade da argamassa contendo 15% de RCV em substituição parcial ao cimento Portland.

Figura 29 – Relação resistência à compressão *versus* porosidade da argamassa de contendo 15% de RCV na composição do material cimentício.

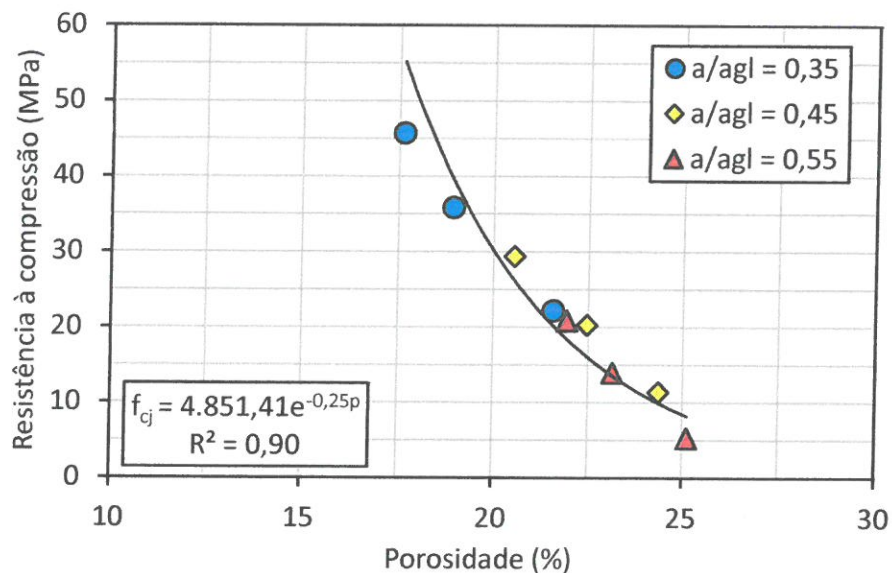


Fonte: A autora.

Na Figura 29, à esquerda, observa-se a porosidade de 18,0% e a resistência à compressão de 48,0 MPa, enquanto que, à direita, esses valores são de 24,2% e 10,6 MPa. Assim sendo, o índice atribuído ao comportamento desta argamassa passou a ser de 6,0 MPa/unidade de porosidade reduzida, valor superior ao obtido na argamassa de referência. Portanto, a redução de uma unidade percentual na porosidade da argamassa contendo 15% de RCV implica em maior incremento na resistência à compressão em relação à argamassa executada somente com cimento Portland.

A relação resistência à compressão *versus* porosidade da argamassa contendo 25% de RCV na composição do material cimentício é apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Relação resistência à compressão *versus* porosidade da argamassa de contendo 25% de RCV na composição do material cimentício.

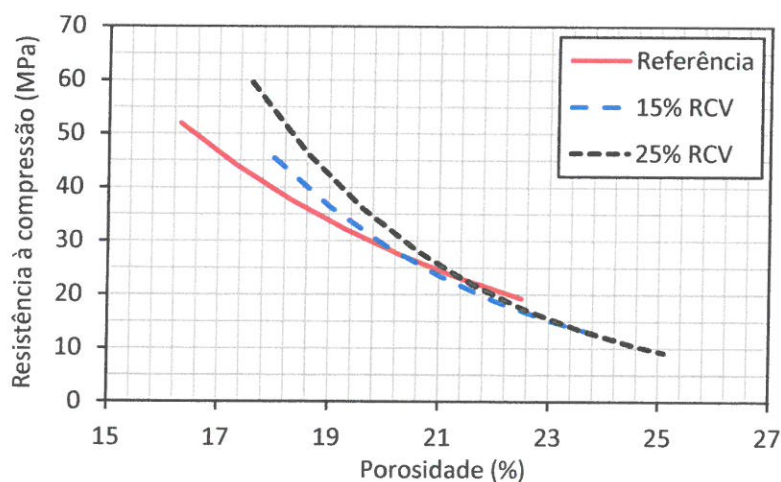


Fonte: A autora.

O ponto extremo esquerdo é composto pela porosidade de 17,6% e resistência à compressão de 45,8 MPa. Já o ponto à direita é representado pela porosidade de 25,1% e resistência à compressão de 5,3 MPa. A partir destes resultados, obteve-se o índice de 5,4 MPa/unidade de redução da porosidade, valor este que também é superior em relação ao obtido para a argamassa de referência.

Na Figura 31 são apresentadas às três curvas de relação resistência à compressão *versus* porosidade das argamassas estudadas.

Figura 31 – Relação resistência à compressão *versus* porosidade das argamassas nas diferentes composições estudadas.



Fonte: A autora.

A partir da análise da Figura 31, verifica-se que a presença do RCV na composição do cimento Portland tende a majorar o incremento da resistência à compressão quando da redução de uma unidade percentual de porosidade. *A priori*, a redução da porosidade depende, quase que exclusivamente, da hidratação do cimento Portland, haja vista a baixa reatividade do RCV. Assim sendo, fica evidente que o ajuste (redução) da relação água/aglomerantes das argamassas contendo RCV para a equiparação da porosidade destas com a referência implicará em valores maiores de resistência à compressão.

4.8 Análise comparativa com o estudo de Souza (2017)

4.8.1 Distribuição granulométrica do RCV

Segundo Garcia *et al.* (2015), as partículas com dimensão inferior a 75 μm são capazes de apresentar reatividade suficiente para atribuir-lhes pozolanicidade. No estudo de Souza (2017), a moagem do RCV, utilizando o equipamento de abrasão Los Angeles, resultou em apenas 6,4% de partículas com dimensão inferior a 75 μm . Segundo a autora, 72,9% do RCV utilizado foi caracterizado como agregado miúdo. Nesse contexto, com o intuito de analisar a influência da finura do resíduo nas propriedades da argamassa, realizou-se o peneiramento do RCV, de forma a se obter o resíduo passante na peneira de abertura de malha de 75 μm .

Na Tabela 7 são apresentados os resultados após o peneiramento do resíduo quanto ao diâmetro máximo característico do RCV, e aos diâmetros referentes a 90%, 50% e 10% da massa das partículas. Apresenta-se, ainda, os resultados obtidos por Souza (2017) para os mesmos parâmetros.

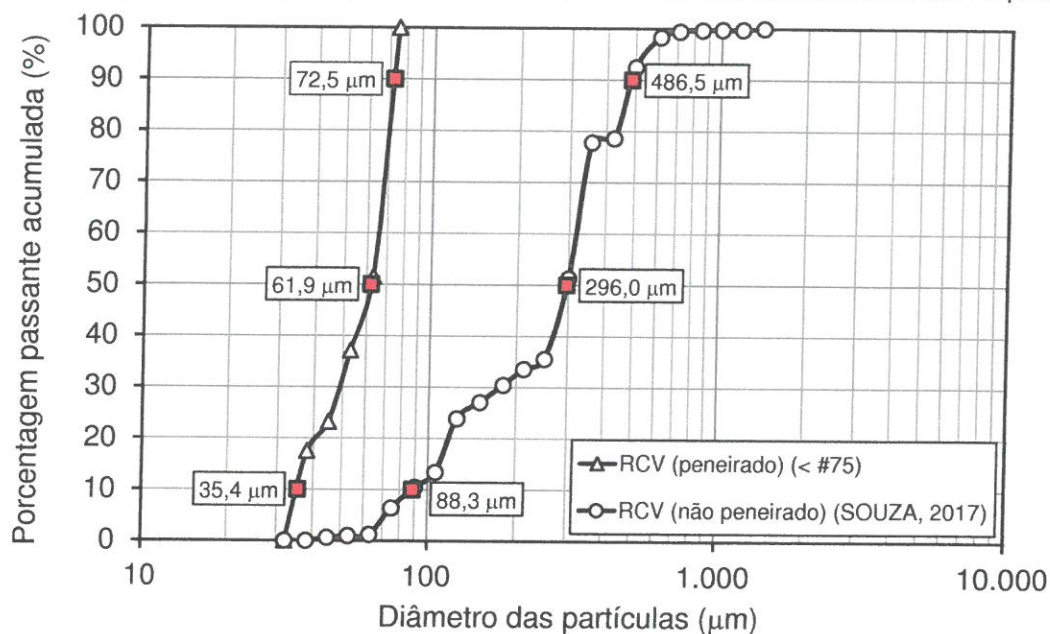
Tabela 7 – Características granulométricas do RCV em ambos os estudos

Granulometria	D _{máx.}	D _{90,0 %}	D _{50,0 %}	D _{10,0 %}
Diâmetro (μm)	75	72,5	61,9	35,4
Diâmetro (μm) (Souza, 2017)	1.180,0	486,5	296,0	88,3

Fonte: A autora.

Na Figura 32 são apresentadas as curvas granulométricas do RCV sendo, uma delas, representativa do trabalho de Souza (2017), e a outra, referente a este estudo.

Figura 32 – Distribuição granulométrica do RCV utilizado no estudo de Souza (2017) e do mesmo pó cerâmico após o peneiramento em peneira com abertura de malha de 75 μm .

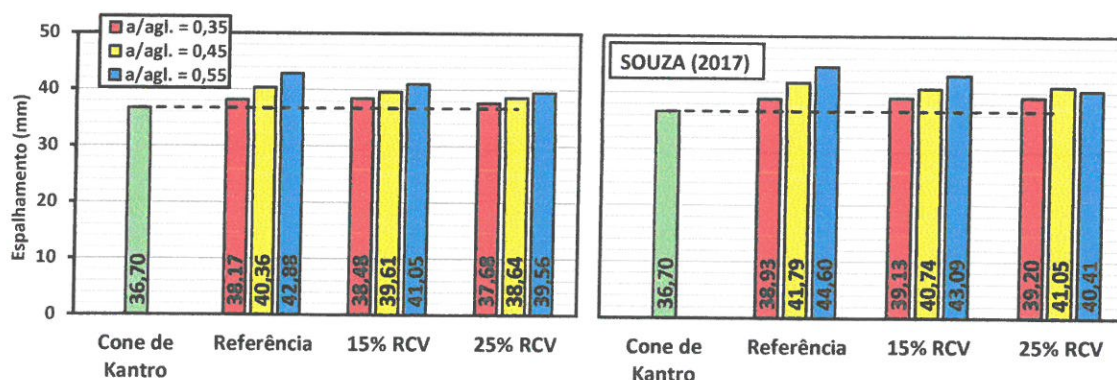


Fonte: A autora.

4.8.2 Ensaio de espalhamento no mini tronco de cone de Kantro

A Figura 33 apresenta os resultados de espalhamento das argamassas em função da distribuição granulométrica do RCV.

Figura 33 – Espalhamento das argamassas em função das diferentes distribuições granulométricas utilizadas na execução das argamassas.



Fonte: A autora.

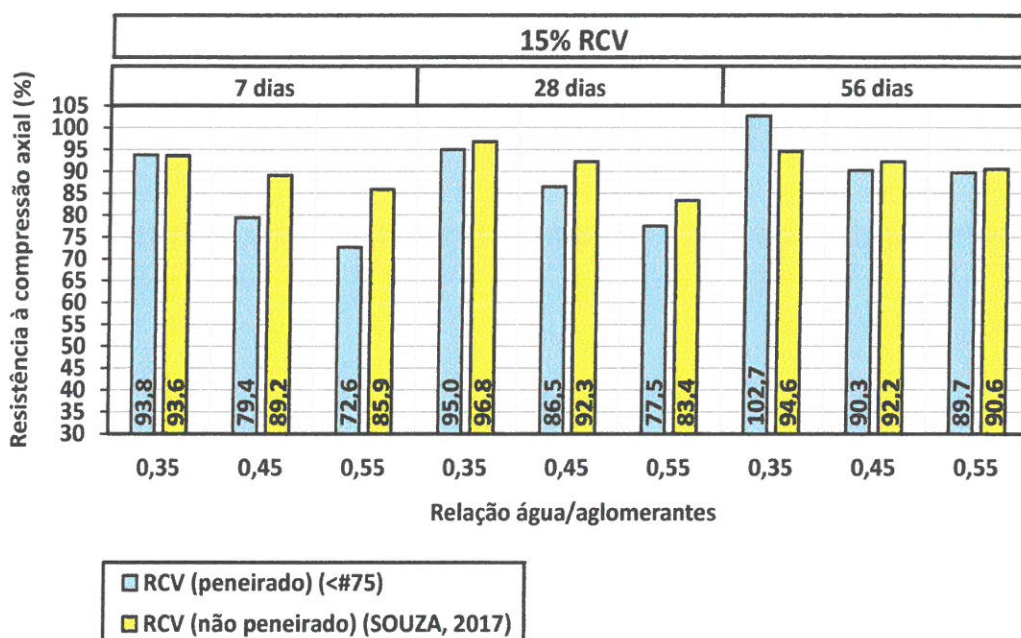
Apesar das limitações do ensaio de espalhamento no mini tronco de cone de Kantro, não foi constatada alteração relevante no comportamento das argamassas quando da variação do tamanho das partículas do RCV. A utilização de menor relação água/aglomerantes resultou, de forma geral, em menor espalhamento, independentemente da granulometria do RCV.

Os resultados apresentados estão de acordo com os resultados de Vieira (2005) e Oliveira *et al.* (2012), os quais afirmam que a redução do tamanho das partículas não altera significativamente a consistência das argamassas.

4.8.3 Resistência à compressão das argamassas contendo RCV em relação às argamassas de referência

A Figura 34 apresenta os percentuais de resistência à compressão das argamassas contendo 15% de RCV em substituição parcial ao cimento Portland em relação às respectivas resistências à compressão das argamassas de referência, para as relações água/aglomerantes 0,35; 0,45 e 0,55. Cabe enfatizar que as argamassas de referência são exatamente as mesmas, ou seja, as argamassas executadas neste trabalho utilizaram o mesmo cimento utilizado por Souza (2017). A diferença está no RCV, decorrente do peneiramento, e do lote de agregado miúdo (areia) utilizado que, apesar de ser da mesma origem, apresentou alterações no tocante as características e distribuição granulométrica.

Figura 34 – Análise comparativa da resistência à compressão percentual das argamassas contendo 15% de RCV, com diferentes distribuições granulométricas, em relação às argamassas de referência.

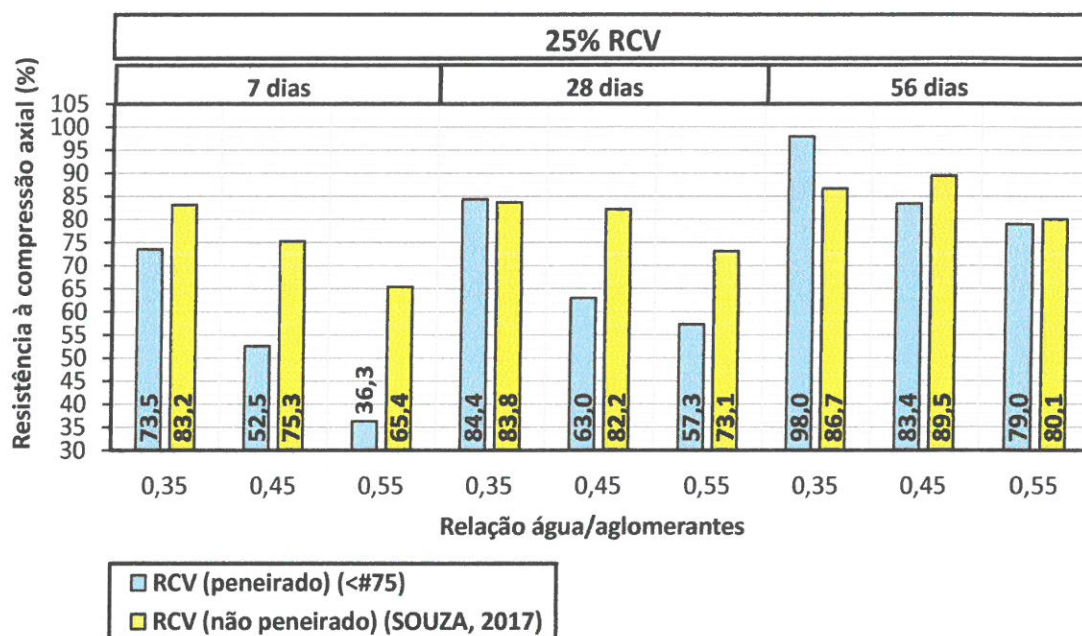


Fonte: A autora.

Como observado na Figura 34, o menor tamanho das partículas de RCV causou alteração comportamental em relação aos resultados de Souza (2017) nas relações água/aglomerantes 0,45 e 0,55, sobretudo nas idades de 7 e 28 dias. Nestas condições a maior finura dos grãos de RCV causou decréscimo na resistência à compressão, a qual foi mitigada aos 56 dias, ou seja, os valores percentuais se equiparam aos obtidos por Souza (2017). Na relação água/aglomerantes = 0,35, não foi constatada alteração comportamental nas idades estudadas.

Na Figura 35 são apresentados os efeitos na resistência à compressão das argamassas contendo 25% de RCV quando da variação da distribuição granulométrica do pó cerâmico.

Figura 35 – Análise comparativa da resistência à compressão percentual das argamassas contendo 25% de RCV, com diferentes distribuições granulométricas, em relação às argamassas de referência.



Fonte: A autora.

A maior finura do RCV utilizado no teor de 25% impactou consideravelmente na resistência à compressão das argamassas nas primeiras idades (7 e 28 dias) quando da mistura nas relações água/aglomerantes 0,45 e 0,55. Na idade de 7 dias, para as relações água/aglomerantes 0,45 e 0,55, a resistência à compressão atingiu 52,5% e 36,3% da resistência à compressão das respectivas argamassas de referência. Estes valores foram significativamente inferiores aos obtidos por Souza (2017). Este mesmo comportamento foi observado aos 28 dias. Entretanto, aos 56 dias, os valores de resistência à compressão das argamassas, apesar da redução em relação às respectivas referências, se equipararam.

Na relação água/aglomerantes 0,35, houve redução na resistência à compressão aos 7 dias em decorrência do uso de RCV com maior finura. Já na idade de 28 dias essa redução foi extinta e, aos 56 dias, a resistência à compressão superou o valor obtido por Souza (2017).

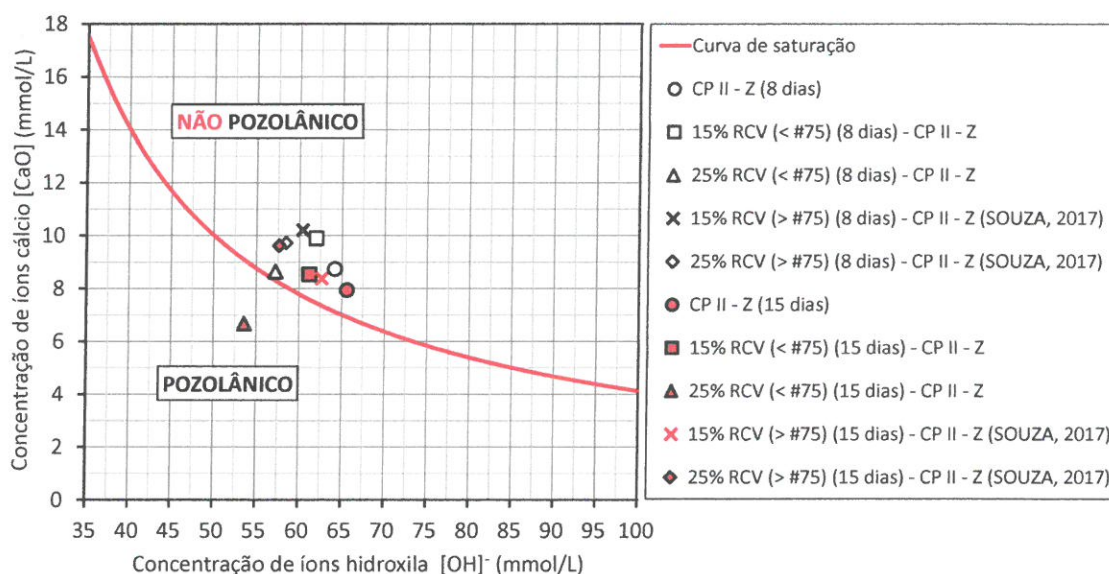
De maneira geral, a maior finura do RCV, independentemente do teor utilizado, exerceu redução na resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, quando as argamassas foram amassadas nas relações água/aglomerantes 0,45 e 0,55. Na idade de 56

dias, pode-se afirmar que as resistências são praticamente iguais. Na relação água/aglomerantes 0,35, o comportamento das argamassas foi praticamente o mesmo nas idades estudadas, independentemente da finura do RCV.

4.8.4 Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico – Ensaio Fratini

Os resultados do ensaio Fratini para o RCV nas diferentes granulometrias são apresentados na Figura 36.

Figura 36 – Resultados do ensaio Fratini para o cimento CP II – Z, 15% RCV e 25% RCV para as diferentes granulometrias.



Fonte: A autora.

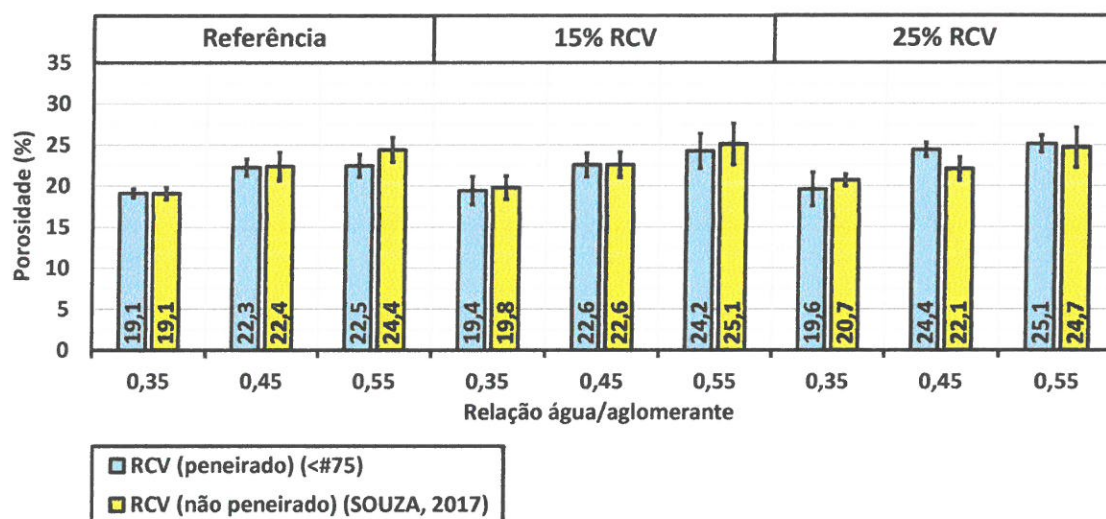
Os resultados atestam que o material quando em menor finura e maior teor pode ser caracterizado como pozolânico. Isto é, a diferente granulometria impactou na atividade pozolânica das pastas. Cabe ressaltar que, independentemente da finura e do teor de utilização do RCV, não foi possível classificar as composições aglomerantes como pozolânicas na idade de 8 dias. Na idade de 15 dias, a maior finura do RCV atribuiu caráter pozolânico ao cimento contendo 25% de RCV. No teor de 15%, esta classificação não foi possível, ou seja, o cimento foi classificado como não pozolânico. Isto evidencia que o consumo de cal pelo RCV é baixo, demandando considerável teor de substituição para que

ocorra a redução dos íons cálcio em solução. No presente estudo, o teor mínimo está situado entre 15 e 25%.

4.8.5 Porosidade das argamassas contendo RCV com diferentes distribuições granulométricas

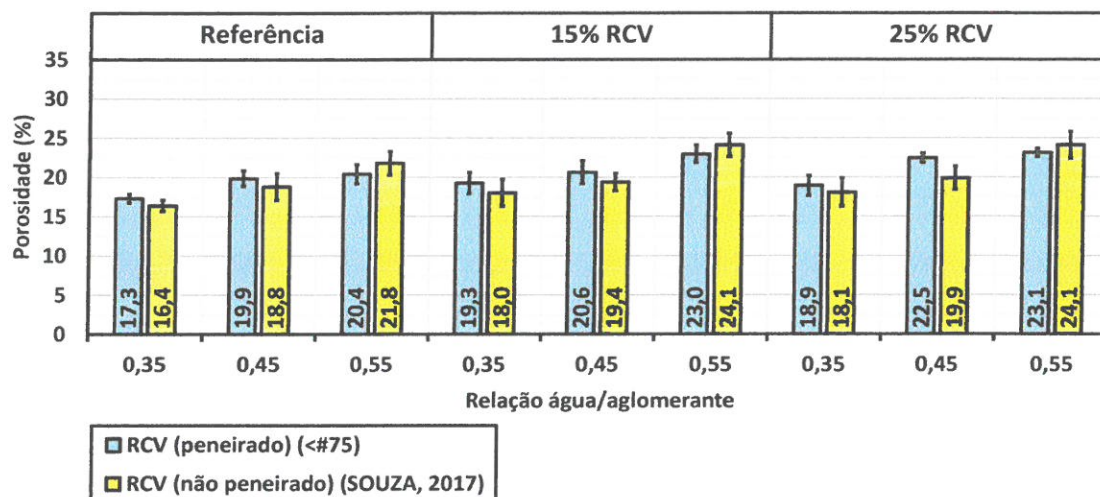
Para determinação da porosidade inicial teórica, foi utilizada a mesma massa específica do RCV do estudo de Souza (2017). Assim, os sistemas estudados possuem as mesmas porosidades iniciais teóricas. A variação da porosidade no tempo de estudo, para cada uma das idades de avaliação, é apresentada a seguir. As porosidades aos 7, 28 e 56 dias para as diferentes composições estudadas são apresentadas nas Figuras 37, 38 e 39, respectivamente.

Figura 37 – Porosidade das argamassas contendo RCV em diferentes teores e finuras, aos 7 dias.



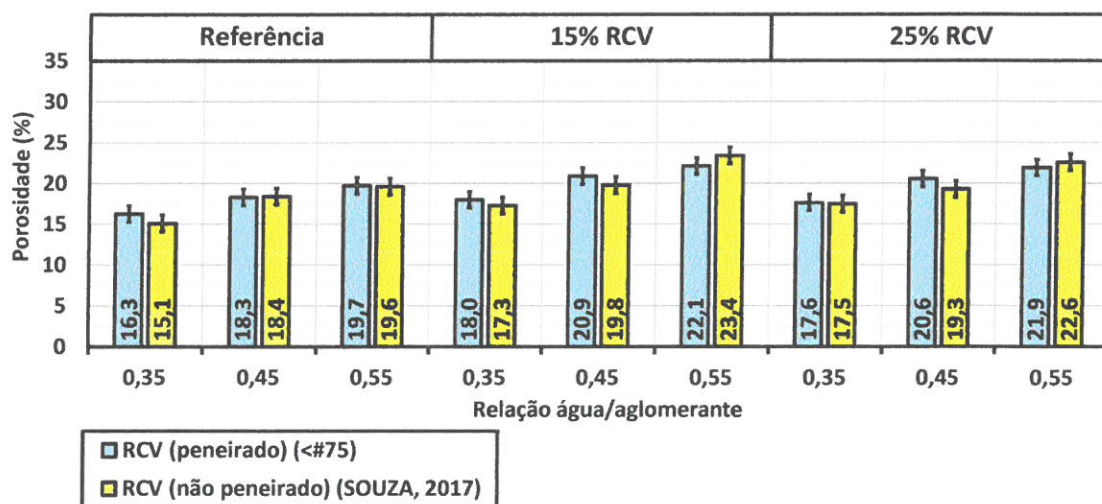
Fonte: A autora.

Figura 38 – Porosidade aos 28 dias.



Fonte: A autora.

Figura 39 – Porosidade aos 56 dias.



Fonte: A autora.

A partir da análise das figuras, observou-se, de maneira geral, que a diferente granulometria do RCV não impactou na porosidade das argamassas equivalentes estudadas. De fato, as porosidades obtidas no presente estudo foram similares às apresentadas por Souza (2017). Assim, conclui-se que a menor finura não influenciou significativamente nesta característica, apesar da alteração observada na resistência à compressão.

5. CONCLUSÃO

O ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico evidenciou que a maior finura do RCV potencializa a sua atividade pozolânica que, apesar de baixa, atribuiu caráter pozolânico ao cimento quando da substituição parcial em teor de 25%. A utilização do RCV com partículas inferiores a 75 μm , no teor de 15%, não atribuiu caráter pozolânico ao cimento Portland composto em laboratório.

Na argamassa contendo 15% de RCV e relação água/aglomerante = 0,35, houve discreta redução da resistência nas idades de 7 e 28 dias em relação à argamassa de referência. Já na idade de 56 dias, houve aumento de 3% na resistência à compressão. Portanto, nesta relação água/aglomerantes, a substituição de cimento Portland por RCV em teor de 15% praticamente não impactou na resistência à compressão da argamassa. No teor de 25%, houve redução na resistência à compressão nas primeiras idades e equivalência aos 56 dias em relação à argamassa de referência.

Nas relações água/aglomerantes = 0,45 e 0,55, para o teor de 15% de RCV, houve redução na resistência à compressão ao longo do tempo estudado, porém esta redução foi sendo gradativamente reduzida, de tal forma que, aos 56 dias, tal redução foi inferior ao teor de substituição de cimento por RCV. No teor de 25%, houve significativa redução nas primeiras idades (7 e 28 dias), porém, no intervalo entre 28 e 56 dias, houve considerável recuperação na resistência à compressão, de tal forma que a redução média aos 56 dias foi, em relação às respectivas referências, de 20%, valor inferior ao teor de RCV utilizado.

No ensaio de porosidade, houve maior redução do volume de vazios quanto maior o teor de cimento Portland na argamassa. Isto é, de maneira geral, houve aumento da porosidade das argamassas contendo RCV quando comparadas às respectivas referências.

Na análise comparativa dos resultados com o estudo de Souza (2017), percebeu-se que a diferente granulometria não alterou significativamente a consistência das argamassas. Na análise da resistência, para os dois teores de substituição, observou-se redução mais acentuada na resistência à compressão em relação às argamassas de referência em comparação aos resultados apresentados por Souza (2017), para as idades iniciais (7 e 28 dias) e nas relações água/aglomerantes 0,45 e 0,55. Aos 56 dias, houve equivalência de resistência à compressão entre os resultados deste estudo e os apresentados por Souza (2017). Na relação água/aglomerantes 0,35, entretanto, essa

redução na resistência foi observada apenas aos 7 dias. Aos 28 dias os resultados dos estudos foram similares e, aos 56 dias, a resistência à compressão superou o valor obtido por Souza (2017). Observou-se a porosidade similar nos dois estudos.

Dessa forma, observou-se que os resultados da resistência à compressão e porosidade das argamassas com partículas inferiores à 75 μm até a idade de 56 dias foram semelhantes aos obtidos para argamassas contendo o RCV sem peneiramento. Assim, analisando apenas até essa idade, não há viabilidade no uso do resíduo peneirado. Entretanto, percebeu-se que há possibilidade de inversão de comportamento para idades superiores aos 56 dias, ou seja, há tendência de que as argamassas contendo RCV atinjam maiores resistências, viabilizando o seu uso, independentemente do peneiramento. Assim, necessita-se de maior investigação em idades mais avançadas para avaliar a viabilidade no uso do resíduo de cerâmica vermelha como substituto parcial de cimento Portland.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a evolução dos compostos hidratados formados por meio de difratometria de raios-X de pastas com os mesmos teores de substituição e mesmas relações água/aglomerantes, afim de avaliar as alterações mineralógicas na hidratação do cimento.
- Analisar a composição química do resíduo passante na peneira de abertura de malha de 75 μm , com o intuito de avaliar se houve alteração na composição mineralógica devido ao peneiramento.

7. 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.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Estudo técnico setorial da cerâmica vermelha**: Subsídios para Elaboração do Plano de Desenvolvimento Sustentável da Cadeia Produtiva de Cerâmica Vermelha, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM C-20 – Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water**. West Conshohocken, 2010.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA, **Dados do Setor**, <<http://www.anicer.com.br>>, consultado em 08/08/2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5753 – Cimento Portland – Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

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

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Disponível em <<http://www.cbicdados.com.br>>. Acessado em 08/08/2017.

CARMO J. B. M. do, PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto.** Revista Cerâmica, v.54, n.331, p. 309-318, 2008.

CASSOL, G. **Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes.** Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2015.

CASTRO, A. L., SANTOS R. F. C., GONÇALVES K. M., QUARCIONI. V. A. **Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica, p. 65- 76, 2017.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução n º 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.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** In: CONCRETO: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 12, p.347.

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.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

FREITAS S. S., OLIVEIRA J. S. de; **Avaliação dos resíduos de cerâmica vermelha como insumo para a produção de cimento Portland.** Revista Ambiental. v. 2, n. 1, p. 80-87. 2016.

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, 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.

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.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio.** Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

KIHARA, Y. CENTURIONE, S. L. **O cimento Portland.** In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

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

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

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) - Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos, 2015. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/>>. Acessado em 09/08/2017.

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.

OLIVEIRA, A. do N. **Estudo da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de cerâmica vermelha.** Trabalho de Conclusão de Curso. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semi - Árido, 2012.

OLIVEIRA, L. A. P., CASTRO-GOMES J. P., SANTOS P. M. S. **The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components.** Construction and Building Materials, v. 31, p. 197-203, 2012.

PRADO, C. M. de O. **Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no estado de Sergipe.** Dissertação de Mestrado. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2011.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. **Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, 2014.

SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal.** Salvador: EDUFBA, 2007.

SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO E MINERAÇÃO DO ESTADO DA BAHIA (SICM). SUPERINTENDENCIA DE INDÚSTRIA E MINERAÇÃO (SIM). COOREENAÇÃO DE MINERAÇÃO (COMIN). **Cerâmica Vermelha da Bahia:** Caracterização tecnológica, disponibilidade de matérias-primas, diagnóstico operacional e cadastro. Aberto Figueiredo Ribeiro – Coordenador. Salvador: SICM/SIM/COMIN, 2005.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Resultados preliminares de 2016. Disponível em <<http://www.snic.org.br/index.asp>>, acessado em 12/09/2017.

SILVA, R. P., BARROS, M. M.S.B., PILEGGI, R. G., JOHN, V. M. **Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow.** VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005.

SILVA A. R., CABRAL K. C., PINTO E. N. de M. G. I. **Substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha em argamassas: Estudo da atividade pozolânica.** 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2016.

SOUZA, G. S. **Resíduo de Cerâmica Vermelha cominuído na composição de cimento Portland: efeitos na resistência à compressão axial e porosidade de argamassas.** Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Oeste da Bahia, 2017.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

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.

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.