



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

**RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E CINZA DE CASCA DE**  
**ARROZ NA COMPOSIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: INFLUÊNCIA**  
**NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, POROSIDADE E**  
**VARIAÇÃO UNIDIMENSIONAL DE ARGAMASSAS**

**BIANCA HELEM DE MORAES SILVA CARVALHO**

**BARREIRAS-BA**  
**FEVEREIRO-2019**

**BIANCA HELEM DE MORAES SILVA CARVALHO**

**RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E CINZA DE CASCA DE  
ARROZ NA COMPOSIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: INFLUÊNCIA  
NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, POROSIDADE E  
VARIAÇÃO UNIDIMENSIONAL DE ARGAMASSAS**

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

Orientador: D. Sc. Juarez Hoppe Filho

**BARREIRAS-BA  
FEVEREIRO-2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

C331 Carvalho, Bianca Helem de Moraes Silva.

Resíduo de cerâmica vermelha e cinza de casca de arroz na composição de cimento portland: influência na resistência à compressão axial, porosidade e variação unidimensional de argamassas. / Bianca Helem de Moraes Silva Carvalho. – 2019.

68f.: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, 2019.

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

CDD 666.95

---

**Biblioteca Universitária de Barreiras**

**BIANCA HELEM DE MORAES SILVA CARVALHO**

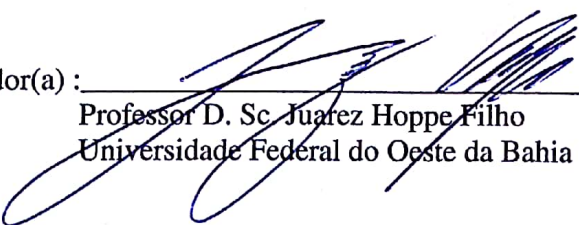
**RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E CINZA DE CASCA DE  
ARROZ NA COMPOSIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: INFLUÊNCIA  
NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, POROSIDADE E  
VARIAÇÃO UNIDIMENSIONAL DE ARGAMASSAS**

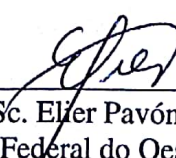
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do  
Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do  
grau de Engenheiro Civil.

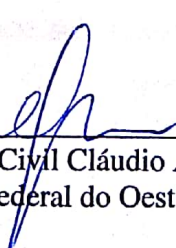
Aprovada em 15 de fevereiro de 2019

**Banca Examinadora**

Orientador(a) : \_\_\_\_\_

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

  
Professor D. Sc. Elier Pavón de la Fé  
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

  
Professor Eng. Civil Cláudio Alex de Oliveira Pires  
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

*Àquele que é poderoso para fazer infinitamente mais do que tudo quanto pedimos ou pensamos de acordo com o seu poder que age em nós.*

## AGRADECIMENTOS

Ao único que é digno de receber a honra e a glória, a força e o poder. Ao Rei eterno, imortal, invisível, Deus único, sejam honra e glória para sempre.

Aos meus amados pais Maurizo e Ester, pela imensurável herança dos valores essenciais que orientam minha vida. Agradeço pelos sacrifícios, compreensão, apoio incondicional e pela fé em um futuro além das possibilidades.

Ao meu orientador Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho pela orientação, dedicação e comprometimento a essa pesquisa; pelos conhecimentos transmitidos e constante incentivo à pesquisa ao longo do curso, o meu respeito, admiração e gratidão.

Às minhas irmãs Beatriz, Bárbara e Bruna e a toda a minha família que, com muito carinho e apoio não mediram esforços para que eu chegasse até aqui.

Ao meu querido esposo Jordhan Carvalho, por seu incansável apoio e incentivo durante todos esses anos.

Aos meus amigos Mariana, Mateus, Gabriel, Johnatas, Rizia, Lorena, Pâmela, Andréia e Valéria pela inestimável amizade, companheirismo e convivência durante esses anos. Sem vocês essa caminhada teria sido árdua.

Ao meu amigo José Antônio pela amizade, troca de conhecimentos e disposição em contribuir na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas Natiele e Vangivaldo pela importante contribuição na realização dos ensaios.

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

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

## RESUMO

A presente pesquisa objetiva avaliar o comportamento de uma mistura binária, composta por 70% de cimento Portland CP V – ARI – RS e 30% de resíduo de cerâmica vermelha (RCV), e uma mistura ternária, composta por 70% de cimento Portland CP V – ARI, 20% de RCV e 10% de cinza de casca de arroz (CCA), utilizadas na execução de argamassas misturadas na relação água/aglomerante (cimento + adições minerais) igual a 0,45. Para tanto, utilizou-se uma amostra de RCV com partículas inferiores a 45  $\mu\text{m}$  e uma amostra de CCA calcinada em leito fluidizado, com alto teor de fração amorfa. As argamassas foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial, porosidade aparente e variação unidimensional. A evolução do comportamento mecânico e da porosidade aparente foi acompanhada ao longo de 56 dias, enquanto que a variação unidimensional foi acompanhada durante 70 dias. A resistência à compressão das argamassas contendo RCV, com e sem adição de CCA, apresentaram redução ao longo do tempo, porém esses decréscimos, da ordem 10%, foram inferiores ao teor de substituição utilizado. A substituição parcial do cimento, compondo misturas binárias ou ternárias, resultou em aumento da porosidade aparente das argamassas, sendo o incremento inferior ao teor de adição mineral utilizado. A utilização do RCV potencializou a retração das argamassas quando em cura submersa, já a argamassa contendo 20% de RCV e 10% de CCA caracterizou-se, predominantemente, pela expansão do material. A variação unidimensional considerada a partir da dimensão inicial teórica (285 mm) evidenciou que as argamassas contendo RCV, com e sem a utilização de CCA, apresentaram maior retração em comparação à argamassa de referência.

**Palavras-chave:** Resíduo de cerâmica vermelha (RCV); cinza de casca de arroz (CCA); resistência à compressão; porosidade aparente; variação unidimensional.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	13
1.2 OBJETIVO .....	15
1.3 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
2.1 ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	18
2.2 ADIÇÕES MINERAIS.....	19
2.3 ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS .....	20
2.3.1 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA .....	20
2.3.2 CINZA DE CASCA DE ARROZ .....	24
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
3.1 MATERIAIS .....	29
3.1.1 CIMENTO PORTLAND .....	29
3.1.2 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA (RCV) .....	29
3.1.3 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) .....	30
3.1.4 AGREGADO MIÚDO .....	32
3.2 COMPOSIÇÃO DOS AGLOMERANTES.....	33
3.3 MÉTODOS.....	34
3.3.1 ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND, RCV E CCA .....	34
3.3.2 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	35
3.3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	39
3.3.4 POROSIDADE DAS ARGAMASSAS .....	41
3.3.5 VARIAÇÃO UNIDIMENSIONAL DAS ARGAMASSAS .....	44
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	46
4.2 POROSIDADE DAS ARGAMASSAS.....	49
4.3 RELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO <i>VERSUS</i> POROSIDADE.....	51
4.4 VARIAÇÃO UNIDIMENSIONAL .....	53
4.5 ANÁLISE COMPARATIVA COM OS ESTUDOS DE SANTANA (2017) E RODRIGUES (2018) .....	56

<b>4.5.1</b>	<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....</b>	<b>56</b>
<b>4.5.2</b>	<b>POROSIDADE DE ARGAMASSAS .....</b>	<b>58</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>62</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado para a moagem do RCV.....	30
Figura 2: Aspecto do RCV cominuído após o peneiramento. ....	30
Figura 3: Aspecto física da CCA.....	31
Figura 4: Padrão de difração de raios-X da amostra de CCA (C: Cristobalita; Q: Quartzo). .....	31
Figura 5: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	33
Figura 6: Representação esquemática dos ensaios realizados no presente estudo. ....	34
Figura 7: Misturador mecânico.....	36
Figura 8: Moldes para produção de corpos de prova prismáticos. ....	37
Figura 9: Corpos de prova prismáticos, da argamassa contendo 30% de RCV e da argamassa de referência revestidas com filme polimérico após a moldagem. ....	38
Figura 10: Corpos de prova prismáticos após a desmoldagem. ....	38
Figura 11: Corpos de prova submetidos à cura submersa em água saturada com cal, em recipientes fechados.....	38
Figura 12: Corpos de prova prismáticos mantidos em ambiente laboratorial. ....	39
Figura 13: Máquina universal utilizada no ensaio de resistência à compressão axial.....	40
Figura 14: Corpo de prova disposto na máquina universal de ensaios para o ensaio de resistência à compressão axial.....	41
Figura 15: Amostras extraídas da região central dos corpos de prova, já submetidos ao ensaio de resistência à compressão, para ensaio de porosidade. ....	41
Figura 16: Balança hidrostática. ....	42
Figura 17: Ultrafreezer utilizado para a paralisação das reações de hidratação das amostras de argamassas. ....	43
Figura 18: Liofilizador utilizado para a secagem, por sublimação, das amostras de argamassas. ....	43
Figura 19: Pórtico comparador de comprimento utilizado no ensaio de variação unidimensional com corpo de prova prismático no momento da medição. ....	45
Figura 20: Evolução da resistência à compressão axial das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,45.....	47

Figura 21: Variação percentual, nas diferentes idades, da resistência à compressão das argamassas contendo RCV e RCV+CCA em relação as respectivas argamassas de referência. ....	48
Figura 22: Evolução da porosidade aparente das argamassas. ....	50
Figura 23: Variação percentual, nas diferentes idades, da porosidade das argamassas contendo RCV e RCV+CCA em relação à respectiva argamassa de referência. ....	51
Figura 24: Relação resistência à compressão <i>versus</i> porosidade das diferentes composições de argamassas. ....	52
Figura 25: Variação unidimensional das diferentes argamassas em estudo, considerando como referência inicial a idade de moldagem das argamassas.....	54
Figura 26: Variação unidimensional das diferentes argamassas em estudo, considerando como referência inicial a idade de 2 dias das argamassas, visando desconsiderar a expansão por restauração.....	55
Figura 27: Análise comparativa da resistência à compressão percentual das argamassas contendo RCV, com diferentes teores, em relação às respectivas argamassas de referência. ....	57
Figura 28: Porosidade das argamassas contendo RCV, em diferentes teores. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição, em massa, dos aglomerantes utilizados no estudo.....	33
Tabela 2: Proporções de mistura das argamassas estudadas. ....	34
Tabela 3: Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial. ....	46
Tabela 4: Resultados do ensaio de porosidade das argamassas contendo RCV e RCV + CCA.....	49

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Dentre os setores industriais do país, o da construção civil ocupa posição de destaque na economia nacional em virtude da significativa representação no Produto Interno Bruto (PIB). Segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), em 2016, a participação do setor no PIB nacional foi de 5,6%. Além disso, a construção civil é fundamental para o desenvolvimento do país uma vez que essa atividade propicia aumento na taxa de emprego e qualidade de vida da sociedade.

Entre os diversos materiais relacionados aos serviços da construção civil, um dos mais importantes é o cimento Portland. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), a produção nacional de cimento Portland no Brasil, em 2016, foi de pouco mais que 57,5 milhões de toneladas e no ano de 2017, 54,0 milhões, configurando um valor per capita de aproximadamente 260 kg de cimento Portland por habitante.

Devido à crise política e econômica, as vendas de cimento no mercado interno, entre janeiro e dezembro de 2018, totalizaram 52,7 milhões de toneladas, conforme divulgado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Este montante representa uma queda de 1,2% frente ao mesmo período de 2017. Entretanto, o SNIC observa que as projeções para 2019 são positivas, com um aumento crescente esperado de 3%.

Durante o processo produtivo do cimento há um grande consumo de recursos naturais, decorrente da extração de matérias-primas de jazidas, bem como grande consumo energético e geração de resíduos. Segundo Queiroz Neto *et al.* (2016), as duas fases de produção do cimento que mais geram resíduos sólidos são a queima da matéria-prima e o descarregamento dos fornos, gerando grande quantidade de entulho. O processo produtivo causa grande impacto ambiental, decorrente da emissão de dióxido de carbono devido à clínquerização da farinha.

A indústria cimenteira brasileira emite, atualmente, aproximadamente 610 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido, valor bem abaixo de países como Espanha (698 kg CO<sub>2</sub>/tonelada), Inglaterra (839 kg CO<sub>2</sub>/tonelada) e China (848 kg CO<sub>2</sub>/tonelada). Apesar da menor emissão em relação aos países citados, há que se buscar tecnologias para reduzir ainda mais esta emissão (Cimento.Org, 2013).

Deste modo, estudos com a finalidade de reduzir as implicações causadas pelos impactos ambientais gerados são indispensáveis 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 (GARCIA *et al.*, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2016; RASOUL, 2018; SOUZA, 2017; SANTANA, 2017; RODRIGUES, 2018).

A incorporação de adições minerais à composição do cimento Portland, por meio do aproveitamento de resíduos provenientes de outros setores produtivos mitiga o passivo ambiental destes setores e reduz o consumo de insumos para a produção do clínquer. Além disso, reduzem o consumo de energia, devido à redução no consumo de matérias-primas para a produção de uma unidade de massa de cimento Portland, contribuindo para a redução da emissão global de CO<sub>2</sub> na atmosfera (SANTANA, 2017).

Nesse contexto, o impacto ambiental causado pela produção do cimento ao meio ambiente pode ser reduzido por meio da incorporação de adições minerais em substituição parcial do cimento Portland, como por exemplo, a cinza de casca de arroz (CCA) e o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) (RODRIGUES, 2018).

O arroz é um cereal indispensável para a alimentação humana, pois serve como sustentação alimentar para mais de três bilhões de pessoas no mundo. Segundo a Companhia Nacional de abastecimento (CONAB, 2018), a maior disponibilidade encontra-se na região Sul do país, sendo o seu consumo anual estimado em 11,5 milhões de toneladas. A produção de arroz no Brasil, em 2017, foi de quase 12,5 milhões de toneladas, com produtividade de 6.144 kg por habitante, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018).

A cinza de casca de arroz é um subproduto da indústria de beneficiamento de arroz. O aproveitamento desta casca como combustível já é uma prática comum e devido ao seu alto poder calorífico, constitui uma fonte alternativa para a produção de energia, sendo amplamente utilizada no parque industrial para a secagem e parboilização dos grãos na própria indústria de beneficiamento (POUEY, 2006).

Se descartadas em locais inapropriados, tanto a casca do arroz quanto as cinzas resultantes da sua queima são fontes geradoras de contaminação que prejudicam tanto o meio ambiente quanto a saúde da população. A CCA já é utilizada em pesquisas da área da construção civil e sua efetividade como adição mineral pozolânica de alta reatividade já está consolidada (TASHIMA, 2006; POUEY, 2006; TASHIMA *et al.*, 2012; GOBBI, 2014; RODRIGUES, 2018).

A indústria cerâmica, ao realizar as atividades inerentes ao processo produtivo, produz resíduos que requerem adequada destinação. O principal resíduo consiste em peças cerâmicas quebradas e/ou trincadas após o processo de queima que, muitas vezes, são descartadas como entulhos. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) (2017), estimou-se que a produção de cerâmica vermelha no Brasil, em 2017, foi de 63,6 bilhões de peças/ano.

Conforme dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2019), a fabricação de blocos e tijolos, por mês, chegam a 4 bilhões de toneladas, já a produção de telhas e tubos são, respectivamente, 1,3 bilhões de toneladas e 325,5 km.

A geração de resíduos vermelhos rejeitados pelas cerâmicas brasileiras representa em média 14% do valor total de produção. A esses 14% de resíduos vermelhos, correspondem em média 3 milhões de blocos por ano, o que equivale a aproximadamente 7500 toneladas de resíduos, sendo a maioria desses resíduos peças cerâmicas provenientes das perdas no processo de produção (SEBRAE, 2008).

Portanto, o volume de resíduo de cerâmica vermelha produzido na indústria da construção é significativo e, por ser enquadrado como resíduo classe A, conforme as diretrizes da Resolução 307 do CONAMA, é passível de reutilização ou reciclagem (SANTANA, 2017).

Tendo em vista a grande quantidade gerada destes dois resíduos (RCV e CCA), a realização de estudos que assegurem a potencialidade para reciclagem na construção civil é inevitável. É de fundamental importância analisar novas concepções que estejam em conformidade com a sustentabilidade e conciliar o desenvolvimento da construção civil com a preservação do meio ambiente.

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos decorrentes da substituição parcial de cimento Portland do tipo CP V – ARI – RS por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e cinza de casca de arroz (CCA), no teor de 30% em massa, sobre a resistência à compressão axial, porosidade aparente (durante 56 dias de hidratação) e variação unidimensional (durante 70 dias de hidratação) de argamassas moldadas na relação água/aglomerante (cimento + adições minerais) igual a 0,45. Também é objetivo obter uma tendência comportamental decorrente da finura do RCV, além da eficiência da utilização da CCA, na compensação do decréscimo

da resistência à compressão e incremento na porosidade aparente quando da utilização destas adições minerais na composição do material ligante. Essa tendência será realizada por meio de comparação com os trabalhos realizados por Santana (2017) e Rodrigues (2018) na Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB).

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil busca constantemente desenvolver novas tecnologias que a tornem sustentável. O aproveitamento de resíduos provenientes de outros setores industriais na composição do cimento Portland é apresentado, atualmente, como um dos principais meios para a solução de parte dos problemas ambientais causados pela produção do cimento Portland.

Sob esse ponto de vista, estudos acerca da viabilidade técnico-científica no que se refere à utilização de resíduos industriais são de extrema importância, principalmente quando a incorporação de adições minerais como, por exemplo, o Resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e a Cinza de casca de arroz (CCA), à composição do cimento Portland proporciona maior durabilidade à matriz hidratada.

As pesquisas relacionadas à utilização do RCV, atualmente, propõem, na maioria, à sua incorporação em argamassas ou concreto não estrutural como agregado miúdo e/ou gráudo, havendo a necessidade de análises quanto às características físico-químicas e dos aspectos envolvidos na interação com o cimento Portland para a sua utilização na composição da matriz cimentícia.

Estudos realizados com a cinza de casca de arroz mostram que este resíduo pode ser incorporado ao cimento Portland, em substituição parcial, na preparação de aglomerantes cimentantes melhorando as propriedades finais do produto formado. Cabe salientar que as propriedades alcançadas pelas argamassas e concretos produzidos com CCA, dependem das características físicas, químicas e mineralógicas da mesma (TASHIMA, 2011).

No estudo realizado por Santana (2017) em argamassas, a substituição de 25% do cimento Portland do tipo CP II – Z por RCV com partículas inferiores a 75 µm, resultou em decréscimo na resistência à compressão e aumento do volume de vazios para a relação água/aglomerante (cimento + RCV) igual a 0,45. Visando compensar esse decréscimo na resistência à compressão, Rodrigues (2018) estudou uma mistura ternária, composta por 70% de cimento CP V – ARI, 20% de RCV, com partículas inferiores a 75 µm, e 10% de cinza de casca de arroz com alto teor de sílica amorfa. De fato, a resistência à compressão diminuiu

e a porosidade aparente aumentou em relação à argamassa de referência. Em decorrência da utilização de diferentes tipos de cimento Portland por parte das autoras, a análise comparativa não pode ser realizada diretamente a partir dos resultados de resistência à compressão e porosidade e, sim, a partir de variação percentual em relação aos respectivos resultados das argamassas de referência.

Diante desta conjuntura, o presente trabalho justifica-se pela análise do efeito da finura do RCV, com partículas inferiores a 45  $\mu\text{m}$ , quando da substituição parcial do cimento Portland para compor misturas binária (70% de cimento + 30% de RCV) e ternária (70% de cimento + 20% de RCV + 10% de CCA). Como o presente trabalho utiliza o cimento Portland do tipo CP V – ARI, porém de marca diferente daquele utilizado por Rodrigues (2018), a análise comparativa dos resultados obtidos neste estudo com aqueles apresentados por Santana (2017) e Rodrigues (2018) devem ser realizados, obrigatoriamente, sobre a variação percentual em relação às respectivas referências dos diferentes estudos.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda os conceitos de atividade pozolânica, adições minerais, adições minerais pozolânicas e os efeitos da utilização de pozolanas, especificamente do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e cinza de casca de arroz (CCA), nas propriedades de argamassas.

### 2.1 ATIVIDADE POZOLÂNICA

As principais fases anidras do cimento Portland são: silicato tricálcico ( $C_3S$ ) ou alita, silicato dicálcico ( $C_2S$ ) ou belita, aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), além da adição de gipsita. Cada fase reage com a água, liberando calor e formando cristais correspondentes a cada uma das três fases sólidas principais (geralmente presentes na pasta endurecida): silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), cristais de hidróxido de cálcio (CH) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) compõe cerca de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento Portland hidratada e é responsável pela alta resistência à compressão, já os cristais de hidróxido de cálcio (CH) constituem cerca de 20 a 25% do volume dos sólidos da matriz hidratada. Sua quantidade em grandes proporções tem efeito desfavorável sobre a resistência química às soluções ácidas. Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ao introduzir materiais pozolânicos neste sistema, a pozolana reage com o hidróxido de cálcio (CH) formado na hidratação do cimento, não apenas consumindo o CH como também produzindo novos compostos cimentícios resistentes tais como o C-S-H (VIEIRA, 2005). Isso ocorre devido a presença de silício e de alumínio amorfos na composição das pozolanas e quanto maior o desarranjo estrutural do material e sua instabilidade em meio básico, mais intensa será a reação pozolânica (FARIAS FILHO, 2000).

Segundo Vieira (2005), a reação pozolânica pode ser descrita por meio da seguinte expressão:



Onde:

$\text{CH}_{\text{cimento Portland}}$  = Hidróxido de cálcio do cimento Portland;

H<sub>2</sub>O = Água;

C-S-H = Silicato de cálcio hidratado;

C-A-H = Aluminato de cálcio hidratado.

As partículas da pozolana residual (que não reagem com os produtos de hidratação do cimento) e outros compostos formados durante a reação pozolânica, como os aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H), atuam somente reduzindo a porosidade da estrutura resultante (efeito fíler). A associação do efeito pozolânico com o efeito fíler, consequente da reação pozolânica, representa uma contribuição significativa para a resistência mecânica e durabilidade da pasta endurecida (VIEIRA, 2005).

## **2.2 ADIÇÕES MINERAIS**

Adições minerais podem ser definidas, conforme Malhotra e Mehta (1996), como qualquer material além de água, agregados e cimento, que é utilizado como um constituinte do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura.

As adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em três grandes grupos: material pozolânico, material cimentante e fíler.

Materiais pozolânicos são definidos, segundo a norma ABNT NBR 12653: 2014 – Materiais pozolânicos, como:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Quanto à origem, os materiais pozolânicos são classificados, segundo a ABNT NBR 12653: 2014 – Materiais pozolânicos, como pozolanas naturais, de origem vulcânica ou sedimentar, e pozolanas artificiais, procedentes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.

Segundo Dal Molin (2005), os materiais cimentantes são aqueles que não necessitam do hidróxido de cálcio, presente no cimento Portland hidratado, para formar produtos cimentantes como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Normalmente a hidratação desses materiais é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para

emprego do material com finalidade estrutural. Porém, quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, sua hidratação é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita, como é o caso da escória granulada de alto-forno.

O fíler é uma adição mineral cominuída com baixa atividade química. Sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2005).

Diante da conceituação dos diferentes tipos de adições minerais, será enfatizada a conceituação das adições pozolânicas em decorrência do uso destas no presente trabalho.

## **2.3 ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS**

Os materiais pozolânicos são classificados pela ABNT NBR 12653: 2014 em classe N, classe C e classe E, segundo suas características físicas e químicas. A Classe N enquadra as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. A classe C contempla as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. A classe E abrange qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes citadas anteriormente.

Em geral, as adições pozolânicas se caracterizam por terem na sua constituição um grande teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e também por apresentarem outras características, como um teor elevado de fase amorfa e grande superfície específica (PONTES, 2011).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada (predominantemente amorfa) são classificadas como superpozolanas.

O resíduo de cerâmica vermelha pode apresentar potencialidade pozolânica além de exercer efeito físico sobre a hidratação do cimento Portland. (GARCIA *et al.*, 2014; GOBBI, 2014; GARCIA *et al.*, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2016)

### **2.3.1 Resíduo de cerâmica vermelha**

Atualmente, existem inúmeros tipos de resíduos de cerâmica de argila vermelha que constituem subprodutos da indústria, cada um com diferenças marcadas pela constituição mineralógica, cor e dureza, em grande parte resultante da matéria-prima utilizada, mas

também do tratamento térmico a que os produtos foram submetidos. (MEDEIROS et al., 2016).

A grande vantagem de se utilizar o resíduo da cerâmica vermelha em materiais cimentícios é pela possibilidade de desenvolvimento de atividade pozolânica por parte desse material, que poderá substituir, assim, uma porcentagem do cimento Portland e/ou do agregado (ALCANTARA e NOBREGA, 2011).

No decorrer dos séculos, o resíduo de cerâmica teve amplo aproveitamento em argamassas. Segundo Santiago (2007), referências a esta adição 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.

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 (SANTANA, 2017). A reação pozolânica ou o caráter inerte do resíduo da cerâmica vermelha é atribuído devido a temperatura de sinterização dos materiais cerâmicos, bem como da composição química e mineralógica da massa cerâmica (VIEIRA, 2005).

De acordo com Zampieri (1989), o desenvolvimento das propriedades pozolânicas dos materiais argilosos se deve, sobretudo, a natureza e ao conteúdo do argilomineral presente, as condições de calcinação e a finura do produto.

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV), quando usado como adição mineral na composição do cimento Portland, pode apresentar características pozolânicas. O desempenho de uma pozolana na argamassa depende de fatores como: teor de substituição, composição química, teor de amorfos, índice de atividade pozolânica, diâmetro médio, forma e massa específica da adição, bem como, a proporção de materiais constituintes da argamassa, o tipo de cimento, agregados, aditivos utilizados e o grau de hidratação em determinada idade (GONÇALVES, 2005).

Nascimento Júnior (2011), avaliou as propriedades mecânicas do concreto com adição de resíduos cerâmicos em substituição parcial ao cimento Portland, nos teores de 10%, 20% e 30%, em massa. O autor avaliou a trabalhabilidade e a resistência à compressão axial dos concretos produzidos. Os resultados obtidos indicam que a substituição de 10% de cimento Portland proporcionou um acréscimo na resistência à compressão do concreto, já as

substituições em 20 e 30% causaram redução desta propriedade mecânica em relação à referência.

Alcântara (2012) caracterizou, em termos de pozolanicidade, os resíduos de cerâmica vermelha; avaliou a temperatura ótima de queima da massa conformada (verde) e requeima para os resíduos, e avaliou propriedades no estado fresco e endurecido de argamassa de assentamento com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de cerâmica vermelha.

Oliveira et al. (2012), analisou a 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. (2015), com estudo das propriedades cimentícias de RCV, enfatizando as propriedades pozolânicas de cerâmicas coletadas nos quatro principais polos paulistas, analisando a influência das composições das matérias-primas utilizadas (massas cerâmicas) e da temperatura de queima. Os resíduos cerâmicos após moagem controlada, mostraram-se adequados para a utilização como adição pozolânica ao cimento Portland.

Sales e Alferes Filho (2014), analisaram a 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. Os autores concluíram que a substituição do cimento por adição de pó cerâmico, nos teores estudados, não causou significativa redução da resistência mecânica visto que a substituição de cimento por 10% causou redução média de 11%. Para a substituição de 20% houve aumento de 11% e para a substituição de 40% de cimento houve uma redução de 17% na resistência à compressão.

Garcia et al. (2014) avaliaram as propriedades pozolânicas de resíduos de cerâmica vermelha, suas relações com a composição das matérias-primas utilizadas nas indústrias (massas cerâmicas) e a temperatura de queima, com vistas ao aproveitamento dos RCV como adição mineral para produto de base cimentícia. Os autores constataram significativa capacidade de fixar cal, classificando o material como pozolânico.

Cardoso e Forti (2015) realizaram estudos para a verificação da atividade pozolânica do RCV e avaliação de argamassas quanto à resistência à compressão. Concluíram que quando finamente moído, o RCV apresenta atividade pozolânica. Os resultados obtidos nas

argamassas com a substituição parcial do cimento por este resíduo, no teor de 20 e 40%, em massa, apresentaram uma redução de resistência à compressão quando comparado à argamassa de referência.

Cassol (2015) caracterizou o resíduo de cerâmica vermelha 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). A autora avaliou 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 de referência. Foi constatada 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.

Medeiros et al. (2016) analisaram a influência da incorporação do RCV moído na composição do cimento Portland, no teor de 10%, em massa, sobre duas propriedades relacionadas à durabilidade do concreto: resistência à ocorrência de reação álcali-silica (RAS) e resistência ao ataque por sulfato de sódio. Os resultados evidenciaram que 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.

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.

Souza (2017) analisou os efeitos da substituição parcial de cimento Portland do tipo CP II-Z por Resíduo de cerâmica vermelha (RCV) cominuído, nos teores de 15 e 25%, em massa, e nas relações água/aglomerantes iguais a 0,35; 0,45; 0,55 no que tange a consistência, a resistência à compressão axial e a porosidade das argamassas. O RCV utilizado pela autora, dispunha de distribuição granulométrica com dimensão máxima de 1.180  $\mu\text{m}$  (1,2 mm). A utilização de RCV na composição do aglomerante reduziu a resistência à compressão e aumentou a porosidade das argamassas.

Santana (2017) dando continuidade ao trabalho de Souza (2017), avaliou os efeitos da substituição parcial de cimento Portland do tipo CP II Z - 32 por RCV cominuído, com

partículas de dimensão inferior a 75 µm, 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, a resistência à compressão axial e a porosidade das argamassas. Os resultados indicaram tendência na redução da resistência à compressão quando comparadas às respectivas argamassas de referência, e aumento do volume de vazios.

Segundo Dal Molin (2005), a utilização de adições minerais na produção de concretos e argamassas promove melhorias nas características técnicas do material cimentante, reduzindo a porosidade do concreto e diminuindo a formação de fissuras de origem térmica em função da redução do calor de hidratação. As adições minerais, quando incorporadas à matriz cimentícia, contribuem para a redução da permeabilidade e absorção do concreto, influenciando de forma positiva na durabilidade.

De acordo com Almeida (2017), a redução da porosidade e da permeabilidade pode ser feita através da redução da relação água/aglomerante ou através da incorporação de adições minerais na mistura do concreto. Segundo Neville (2015), a redução da permeabilidade é extremamente importante visto que o material fica menos sujeito à entrada de agentes agressivos.

A incorporação de adições minerais, em substituição parcial ao cimento, acarreta em modificações microestruturais que interferem na porosidade da matriz hidratada e, sobretudo, na interconectividade dos poros, influenciando no ingresso de água contaminada (HOPPE FILHO *et al.*, 2015).

### **2.3.2 Cinza de casca de arroz**

Do processo de obtenção do arroz, gera-se uma enorme quantidade de casca de arroz. O aproveitamento desta casca como combustível já é uma prática comum, porém o resíduo cinza de casca de arroz ainda é depositado a céu aberto, demonstrando uma prática que não satisfaz às crescentes preocupações ambientalistas (THASHIMA, 2006).

A casca do arroz é uma capa lenhosa do grão, dura e altamente silicosa. Na sua composição encontram-se 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica, em base anidra. No processo de combustão da casca de arroz, a matéria orgânica (lignina e celulose) é perdida, restando principalmente sílica e algumas impurezas como carbono, potássio, cálcio e sódio (THASHIMA, 2006).

A casca de arroz é um subproduto da indústria de beneficiamento de arroz. Em média, cada tonelada de arroz, produz 200 Kg de casca de arroz e estas após a conclusão da produzem 40 Kg de cinzas. A área da superfície das cinzas incineradas varia de 60 a 100 m<sup>2</sup>/g quando determinada pela adsorção de nitrogênio. A análise química das cinzas de arroz produzidas pela incineração das cascas, mostram que o conteúdo de sílica varia de 85 a 95%, álcalis (K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O) de 1 a 2% e carbono não queimado de 3 a 18% (BUI D.D., 2001).

De acordo com Pouey (2006) os processos de queima da casca de arroz podem ocorrer de maneiras distintas: combustão controlada e combustão não controlada. Tais processos dependem basicamente do tipo de equipamento utilizado (a céu aberto, fornalhas tipo grelha e leito fluidizado), temperatura de queima e tempo de exposição durante o processo.

A combustão controlada pode ser um método eficaz para liberar a sílica da casca de arroz. Entretanto, os atributos de SiO<sub>2</sub> e a quantidade de C resultantes na cinza dependem substancialmente das condições predominantes durante a combustão (James e Rao, 1986 apud POUEY, 2006). A CCA tende a ter a cor preta devido à presença de carbono residual. No entanto, a coloração pode ser cinza, púrpura ou branca conforme as impurezas presentes e das condições de queima (HOUSTON, 1972 apud POUEY, 2006).

A queima da casca de arroz até 500°C produz uma cinza de cor preta, rica em carbonos fixos e composta principalmente por sílica amorfa, segundo Bartha (1995). A cinza torna-se mais clara, a partir de 750°C, por efeito da oxidação dos carbonos fixos, e a sílica mais cristalina. A extração dos carbonos fixos se dá pela presença de oxigênio no ar.

Segundo Dal Molin (1991), ao substituir parte do cimento por CCA, tal como outras pozolanas, ocorre uma modificação na microestrutura da pasta de cimento, pois ao se combinarem com o hidróxido de cálcio livre, geram uma pasta mais homogênea, compacta, mais resistente e com menor calor de hidratação. Além da reação química, provocam efeito microfíler, devido ao tamanho das partículas, que se introduzem entre grãos do cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como pontos de nucleação, dificultando a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio.

A cinza da casca do arroz contribui para o aumento da resistência à compressão axial. O seu emprego se torna satisfatório em virtude das cinzas apresentarem elevado teor de sílica em sua composição, apresentando características pozolânicas, ou seja, quando trabalhadas isoladamente, as cinzas não apresentam caráter aglomerante, porém quando reduzidas à pó

fino e em presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio e formam compostos cimentantes (BEZERRA, 2010).

Segundo Lemes (2013), a adição de cinza da casca do arroz (sílica) ao cimento, juntamente com os demais agregados (grauído e miúdo), possibilita a produção de concretos e argamassas mais compactas e com menor quantidade de vazios, reduzindo a porosidade, proporcionando maior durabilidade e diminuído sua vulnerabilidade frente ao ataque de agentes agressivos.

Basquiroto et al. (2014) apresentam um estudo comparativo da influência da substituição parcial do cimento Portland pozolânico por uma CCA comercial, em teores de 10%, 15% e 20%, em massa, nas propriedades do concreto convencional nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias. As misturas foram avaliadas quanto à resistência à compressão axial. No ensaio de resistência à compressão, a mistura com 15% de substituição nas idades 28, 56 e 91 dias foi a que apresentou os melhores resultados, com resistências estatisticamente iguais às da referência nas idades 28 e 56 dias e ligeiramente superior aos 91 dias.

Tashima et al. (2012) apresentaram um método de produção para obtenção de cinza de casca de arroz (CCA) de elevada reatividade a partir de um processo de combustão não controlado. Pela Análise Termogravimétrica (TGA), foi possível quantificar o consumo de portlandita por parte da CCA, ou seja, a reação pozolânica. Neste estudo, foram produzidas argamassas com diferentes teores de CCA (5%, 10% e 15%) a fim de fundamentar sua influência nas propriedades mecânicas. Os resultados obtidos mostram que a CCA em estudo apresenta elevada reatividade, podendo ser utilizada como uma fonte alternativa à sílica ativa.

Lemes (2013) analisou a viabilidade técnica da utilização da cinza da casca de arroz, como substituição parcial do cimento, em argamassas de assentamento e de revestimento para paredes de bloco cerâmico de vedação e estrutural. Para o desenvolvimento da pesquisa as substituições parciais do cimento por CCA foram realizadas nos teores de 10%, 15%, 20% e 30%. Foram realizados alguns ensaios, no estado endurecido, tais como: resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial e resistência de aderência. Os ensaios realizados nas argamassas de assentamento e revestimento apresentaram resultados satisfatórios quanto aos desempenhos mecânicos, concluindo-se que a utilização da CCA na produção de argamassas é viável tecnicamente.

Gobbi (2014) testou diferentes técnicas de investigação de pozolanicidade de adições minerais, utilizando amostras de cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa, fíler

quartzoso, fíler calcário e material de cerâmica vermelha com diferentes graus de moagem (0,5; 1,0 e 1,5 h). De acordo com a autora, a análise conjunta do índice de atividade pozolânica IAP com a DRX visou demonstrar que algumas pozolanas apresentam baixo desempenho quando avaliadas por intermédio da resistência à compressão de argamassas, porém são capazes de fixar grande quantidade de cal na formação de compostos hidratados.

Souza et al. (2014) apresentaram uma análise comparativa da influência da substituição parcial, em massa, do cimento Portland pozolânico por uma CCA comercial, em diferentes teores (10%, 15% e 20%), nas propriedades do concreto convencional nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias. As misturas foram avaliadas quanto à resistência à compressão axial e diametral. Os resultados indicaram que emprego da CCA na composição dos concretos não geram influência relevante quanto às propriedades mecânicas.

Silva, B. e Silva, V. (2015) analisaram o comportamento da CCA como substituição parcial do cimento Portland em teores de 5% e 15%, na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada. As peças de concreto foram ensaiadas com idades de 7, 28 e 56 dias para análise de resistência à compressão. Os resultados de resistência não trouxeram dados significativos para a utilização de CCA. Os autores concluíram que, de maneira geral, as composições de concretos com a adição de CCA apresentadas no estudo precisam ser aprimoradas para atender a resistência mínima de 35 MPa preconizada na norma ABNT NBR 9781: 2013.

Huang e Ye (2016) avaliaram os efeitos da utilização, em pastas, de CCA, com diferentes tamanhos médios de partículas, sobre a mitigação da retração autógena e a variação da umidade relativa interna do material. Os resultados mostraram uma alta eficiência da CCA para fins de cura interna, reduzindo drasticamente a retração autógena das pastas de cimento.

Segundo estudos realizados por Rasoul (2018), a retração por secagem é significativamente afetada pela estrutura silicosa e finura das partículas da cinza de casca de arroz (CCA) por ele avaliada. O uso de CCA para aplicação em argamassas mostrou excelente desempenho na retração por secagem, reduzindo essa variação dimensional.

Segundo Rasoul (2018), os parâmetros que afetam a tensão de contração seca são a estrutura silicosa da CCA, tamanho dos grãos e teor de substituição. O tamanho médio efetivo sugerido das partículas para a mitigação da retração por secagem de misturas contendo CCA, é superior a 20,0  $\mu\text{m}$ . Partículas de tamanho mais grosseiro implicam em

menor retração por secagem. O autor verificou que a máxima retração por secagem foi registrada entre 3 e 7 dias nas misturas estudadas.

Rodrigues (2018) avaliou o comportamento de misturas ternárias compostas por 70% de cimento Portland do tipo CP V – ARI, 20% de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e 10% de cinza de casca de arroz (CCA) utilizadas na execução de argamassas misturadas nas relações água/aglomerante de 0,35; 0,45 e 0,55. Para o estudo, a autora utilizou uma amostra de RCV com diferentes finuras (RCV moído e RCV peneirado). As argamassas foram submetidas aos ensaios de resistência a compressão axial e porosidade. As composições cimentícias também foram avaliadas quando a sua pozolanicidade através do ensaio Fratini.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas, moldadas com relação água/aglomerante 0,45 e 0,55, contendo RCV e CCA nas idades de 7 e 28 dias, apresentaram decréscimo em comparação à argamassa de referência. O mesmo não ocorreu para a relação água/aglomerante de 0,35. Porém, aos 56 dias, independentemente da relação água/aglomerante, os resultados de resistência à compressão das argamassas contendo RCV e CCA foram semelhantes aos da argamassa de referência.

As porosidades das argamassas contendo RCV (moída ou peneirada) e CCA foram similares às observadas na argamassa de referência, quando da moldagem na relação água/aglomerante 0,35. Para as relações de 0,45 e 0,55, as argamassas contendo RCV (moído ou peneirado) e CCA apresentaram porosidades maiores que as observadas na argamassa de referência. Apesar da finura não ter influenciado significativamente nos resultados de resistência à compressão e porosidade, o ensaio de pozolanicidade (Fratini) indicou que a maior finura do RCV propiciou maior teor de cal fixado por atividade pozolânica.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

No presente capítulo são apresentados os materiais utilizados na etapa experimental do trabalho, além dos métodos empregados para cumprir o objetivo proposto. Para tanto, foi detalhada a descrição dos ensaios realizados para a avaliação das argamassas. Todos os procedimentos experimentais foram realizados no laboratório de construção civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, *Campus Barreiras*.

#### **3.1 MATERIAIS**

##### **3.1.1 Cimento Portland**

Para a execução das argamassas, foi utilizado o Cimento Portland da marca CIPLAN do tipo CP V – ARI – RS, conforme classificação da ABNT NBR 16697:2018 – Cimento Portland - Requisitos. A opção de uso deste material se justifica pelo baixo teor de adição presente na composição, o que mitiga qualquer interferência no estudo da atividade pozolânica do RCV e da CCA utilizadas na composição dos aglomerantes preparados em laboratório. A massa específica do cimento foi adotada como 3,12 g/cm<sup>3</sup>.

##### **3.1.2 Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV)**

O resíduo de cerâmica vermelha utilizado foi obtido através da moagem de blocos de vedação recolhidos no município de Riachão das Neves/BA. A moagem foi realizada no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), em equipamento de abrasão Los Angeles, da marca AMC (Figura 1), utilizando 12 esferas de aço de diâmetro de 46,66 mm e 445 gramas cada. A carga de RCV para a moagem foi de 10 kg e o tempo de processamento foi de 3,5 horas.

Figura 1: Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado para a moagem do RCV.



Fonte: A autora

Após a moagem, o resíduo foi peneirado utilizando agitador de peneiras durante 10 min. No presente trabalho, utilizou-se apenas o resíduo passante na peneira de abertura de malha de 45  $\mu\text{m}$ . A massa específica do RCV foi adotada como 2,63  $\text{g}/\text{cm}^3$ . O aspecto do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) após o peneiramento é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Aspecto do RCV cominuído após o peneiramento.



Fonte: A autora.

### 3.1.3 Cinza de Casca de Arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz utilizada na pesquisa (Figura 3) foi obtida comercialmente na empresa Pilecco Nobre, em Alegrete/RS. A cinza provém da queima controlada em

caldeira com leito fluidizado, apresentando, portanto, estrutura totalmente amorfa e teor de carbono residual desprezível. Os ensaios de caracterização físico-química foram realizados em instituição colaboradora e contemplam a massa específica e análise química por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).

Figura 3: Aspecto física da CCA.

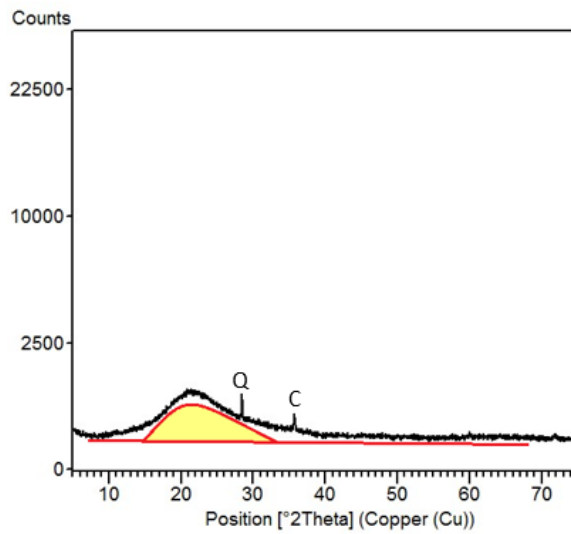


Fonte: A autora.

A massa específica da amostra é de  $2,12 \text{ g/cm}^3$  e sua composição química contempla: 88,9% de  $\text{SiO}_2$ , 4,2% de  $\text{K}_2\text{O}$ , 2,1%  $\text{SO}_3$ , 1,1% de  $\text{CaO}$ , 0,1% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 2,4% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Por ser queimada em processo controlado, não apresenta perda ao fogo. Não houve viabilidade de prazo para aquisição do diâmetro máximo das partículas e da área superficial BET da amostra de CCA utilizada, devido ao ensaio de caracterização físico-química ser realizado em instituição colaboradora.

As fases cristalinas e conteúdo amorfo presentes na composição da amostra de CCA pode ser identificada por difratometria de raios-X (DRX), a partir da existência de halo característico de estrutura amorfa no perfil difratométrico. O ensaio da amostra de CCA foi realizado em difratômetro Rigaku modelo Ultima IV, utilizando tubo com ânodo de cobre, 40 kV/30 mA e fenda divergente de  $1^\circ$ . A análise foi realizada a partir de  $5^\circ 2\theta$  até  $75^\circ 2\theta$ , com passo angular de  $0,02^\circ 2\theta$  e tempo por passo de 1 segundo. A Figura 4 apresenta o perfil difratométrico da amostra de CCA.

Figura 4: Padrão de difração de raios-X da amostra de CCA (C: Cristobalita; Q: Quartzo).



Fonte: Hoppe Filho, 2017.

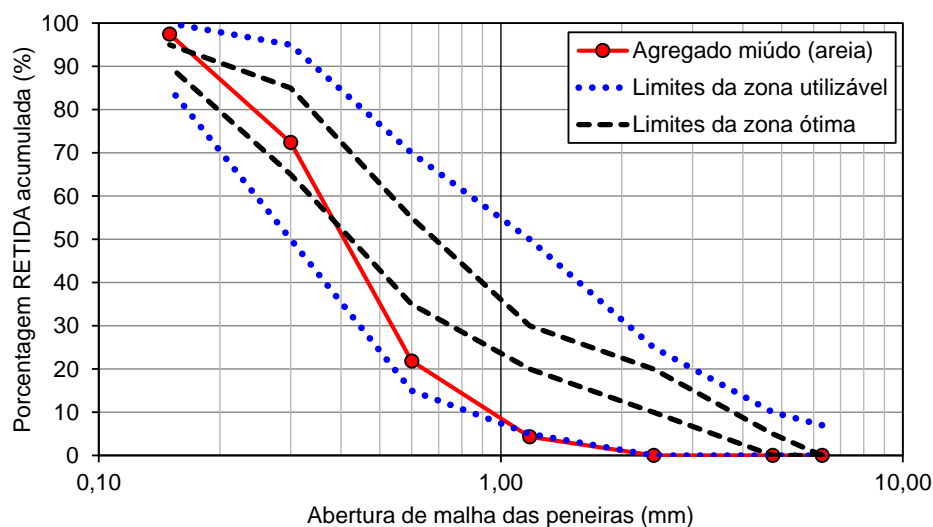
Como pode ser observado na Figura 4, a amostra de CCA apresentou composição 100% amorfa com resquícios de quartzo e cristobalita.

#### 3.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a execução das argamassas foi caracterizado por Rodrigues (2018) e apresenta características típicas de areia extraída de leito de rio, encontrada na região de Barreiras/BA. A massa específica da areia é de 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

A curva granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Rodrigues, 2018.

Conforme observado por Rodrigues (2018), o agregado não atende aos limites da zona utilizável determinados na ABNT 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

O aglomerante de referência utilizado foi o cimento CP V – ARI, a partir do qual foram preparadas as composições binária e ternária, representadas pela substituição parcial do cimento no teor de 30%, em massa, por RCV e CCA, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Composição, em massa, dos aglomerantes utilizados no estudo.

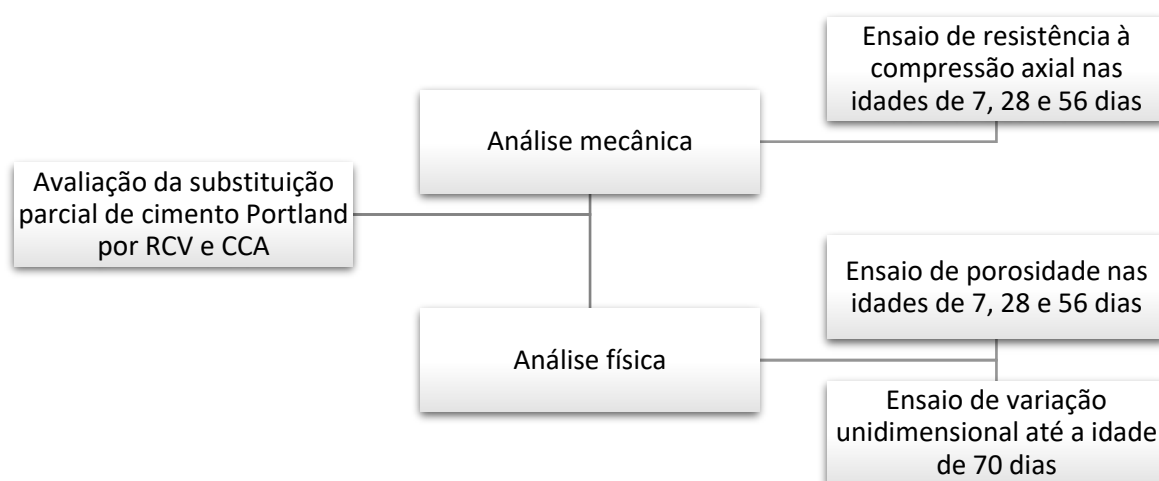
Argamassa	Cimento Portland CP V – ARI – RS	Resíduo de cerâmica vermelha	Cinza de casca de arroz
CP V - ARI	100 %	---	---
CP V + RCV	70 %	30%	---
CP V + RCV + CCA	70 %	20%	10 %

Fonte: A autora.

### 3.3 MÉTODOS

A Figura 6 apresenta a representação esquemática com os ensaios realizados para a análise da influência da substituição parcial do cimento por RCV e CCA, sobre as propriedades do estado endurecido das argamassas.

Figura 6: Representação esquemática dos ensaios realizados no presente estudo.



Fonte: A autora.

#### 3.3.1 Argamassas de Cimento Portland, RCV e CCA

As proporções de misturas unitárias das argamassas, em massa, são apresentadas na Tabela 2. A relação água/materiais secos utilizada na determinação da proporção de mistura foi de 18%, a fim de garantir adequada consistência para a moldagem dos corpos de prova, e a relação água/aglomerante foi de 0,45 para as todas as misturas.

Tabela 2: Proporções de mistura das argamassas estudadas.

Argamassa	Cimento CP V - ARI	RCV	CCA	Agregado miúdo	Relação Água/aglomerante
CP V - ARI	1,0	--	--		
CP V + RCV	0,7	0,30	--	1,50	0,45
CP V + RCV + CCA	0,7	0,20	0,10		

Fonte: A autora.

### 3.3.2 Preparação das argamassas

Previamente à mistura das argamassas o material ligante, constituído por cimento e RCV, com ou sem CCA, foi homogeneizado em recipiente polimérico fechado e mantido sob agitação manual por 5 minutos para garantir que durante a mistura houvesse maior homogeneidade das argamassas.

A mistura das argamassas foi realizada conforme a ABNT NBR 7215:1996 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Para tanto utilizou-se o misturador mecânico que contém uma cuba de aço inoxidável com capacidade de, aproximadamente, 5 litros e uma pá metálica que gira em torno de si mesma e em movimento planetário.

Inicialmente toda a quantidade de água de mistura foi colocada na cuba e em seguida foi adicionado gradativamente o material aglomerante previamente homogeneizado. A mistura desses materiais foi feita com o misturador na velocidade baixa, durante 30 segundos. Após esse tempo, sem paralização da mistura, iniciou-se a colocação da areia (agregado miúdo), em frações, durante 30 segundos. Imediatamente após o término da colocação da areia, mudou-se para a velocidade alta, misturando-se os materiais nesta velocidade durante 30 segundos. Após este tempo, o misturador foi desligado durante 1 minuto e 30 segundos. Nos primeiros 15 segundos, retirou-se, com o auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-se no interior da cuba. Durante o tempo restante, a argamassa ficou em repouso na cuba. Imediatamente após este intervalo, ligou-se novamente o misturador na velocidade alta, por mais 1 minuto. A Figura 7 apresenta o misturador mecânico (argamassadeira) utilizado no preparo das argamassas.

Figura 7: Misturador mecânico.



Fonte: A autora.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme a ABNT NBR 7215:1996, utilizando moldes cilíndricos, com dimensões de  $\varnothing 5 \times 10$  cm. 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 moldes cilíndricos foram previamente lubrificados com óleo e, então, a argamassa recém misturada foi lançada em quatro camadas. Cada camada foi adensada, utilizando soquete padrão, com 30 golpes por camada. As argamassas foram desmoldadas após 24 horas e submetidas à cura submersa em água saturada com cal até as idades de ensaio (7, 28 e 56 dias).

A moldagem das barras de argamassa foi realizada conforme a ABNT NBR 13583:2014 – Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sódio, utilizando moldes de aço com dimensões de 25 x 25 x 285 mm. Os moldes foram levemente untados com óleo mineral e, na sequência, os pinos de medida foram rosqueados nas fôrmas com cuidado, evitando o contato com óleo. Os moldes utilizados são apresentados na Figura 8.

Figura 8: Moldes para produção de corpos de prova prismáticos.



Fonte: A autora.

A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após o amassamento e com maior rapidez possível. A colocação da argamassa nas formas foi feita com o auxílio de uma espátula, em duas camadas aproximadamente iguais, sendo cada uma delas devidamente adensada, através de batidas com a espátula ao longo dos corpos de prova e batidas dos moldes contra a superfície de apoio. Para se obter corpos de prova homogêneos e sem vazios, as argamassas foram adensadas junto aos cantos, aos pinos e ao longo da superfície do molde. A camada superior das argamassas, depois de adensada, foi rasada com o auxílio de uma régua metálica. Os corpos de prova, logo após a moldagem, foram recobertos com filme plástico para evitar a perda de água por evaporação (Figuras 9). Foram moldados três corpos de prova para cada uma das argamassas estudadas. Após as primeiras 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados (Figuras 10), tiveram sua primeira leitura de variação dimensional realizada, através do pórtilho comparador de comprimento e foram submetidos à cura submersa em água saturada com cal ( $1,5 \text{ g Ca(OH)}_2/\text{L}$ ), em recipientes fechados (Figura 11) para evitar a troca de umidade com o ambiente. As leituras se estenderam até a idade de 70 dias. Para isso, os corpos de prova eram retirados, todos os dias, da água com cal e medidos no extensômetro.

Figura 9: Corpos de prova prismáticos, da argamassa contendo 30% de RCV e da argamassa de referência revestidas com filme polimérico após a moldagem.



Fonte: A autora.

Figura 10: Corpos de prova prismáticos após a desmoldagem.



a: CP V – ARI

b: 70% CP V + 30% RCV

c: 70% CP V + 20% RCV + 10% CCA

Fonte: A autora.

Figura 11: Corpos de prova submetidos à cura submersa em água saturada com cal, em recipientes fechados.





Fonte: A autora.

O volume de solução saturada com cal em cada recipiente foi de 10 litros, o que resultava, em função das dimensões dos recipientes, em uma lâmina de água de 8 cm.

Os corpos de prova foram apoiados sobre tubos de PVC de 12,7 mm (1/2 polegada). Aos 56 dias de idade, os corpos de prova foram retirados da cura submersa e mantidos, devidamente apoiados, em ambiente laboratorial para acompanhamento da retração por secagem (Figura 12), tendo suas leituras realizadas até a idade de 70 dias.

Figura 12: Corpos de prova prismáticos mantidos em ambiente laboratorial.



Fonte: A autora.

A temperatura e umidade relativa do ambiente laboratorial não foram controlados devido à falta de equipamentos necessários por parte da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) durante o período de realização da pesquisa.

### 3.3.3 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado nas idades de 7; 28 e 56 dias em máquina universal de ensaios da marca EMIC (Figura 13), modelo DL-30000, conforme as diretrizes da ABNT NBR 7215:1996.

O ensaio foi realizado em corpos de prova que foram imediatamente retirados da cura submersa, ou seja, foram ensaiados em condição saturada. Para cada argamassa, em cada idade de ensaio (7, 28 e 56 dias), foram ensaiados quatro corpos de prova. A média dos quatro resultados do ensaio representa a resistência à compressão axial da argamassa.

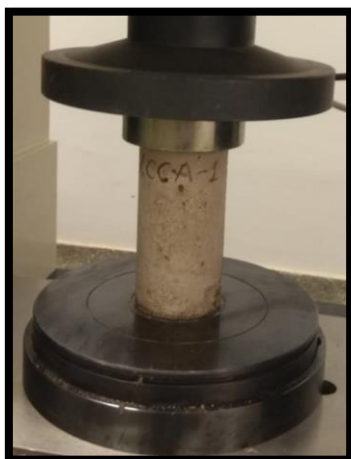
Figura 13: Máquina universal utilizada no ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: A autora.

As imperfeições das superfícies planas nos corpos de prova foram mitigadas pelo uso de um prato de aço que acomoda um disco de neoprene. A disposição de um corpo de prova, com o prato de aço contendo o disco de neoprene, na máquina universal de ensaios para o ensaio de resistência à compressão é apresentada na Figura 14.

Figura 14: Corpo de prova disposto na máquina universal de ensaios para o ensaio de resistência à compressão axial.



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 já submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial. As amostras (Figura 15) a serem ensaiadas para a determinação da porosidade foram extraídas da região central dos corpos de prova, já fragmentados, com o auxílio de marreta e talhadeira. A geometria das amostras obtidas era bastante irregular, porém com dimensão máxima aproximada de 5,0 mm e sem a presença da superfície externa do corpo de prova. O cuidado com a dimensão máxima e a ausência da superfície externa teve como objetivo facilitar a secagem da amostra por liofilização e evitar a influência do efeito parede propiciado pela argamassa em contato com o molde metálico.

Figura 15: Amostras extraídas da região central dos corpos de prova, já submetidos ao ensaio de resistência à compressão, para ensaio de porosidade.



Fonte: A autora.

As amostras recém extraídas, foram submersas em água para não sofrerem secagem superficial, permanecendo nesse estado por cerca de 1 hora. Na sequência, foram secas superficialmente para determinação da massa saturada superfície seca ( $M_{SSS}$ ), sendo posteriormente submergidas em balança hidrostática para a determinação da massa submersa ( $M_{SUB}$ ). A balança eletrônica utilizada é da marca Marte, modelo AD2000, com precisão de 0,01 g. Na Figura 16 está apresentada a adequação da balança eletrônica para determinação da massa submersa da amostra.

Figura 16: Balança hidrostática.



Fonte: A autora.

Após a determinação da massa saturada superfície seca ( $M_{SSS}$ ) e da massa submersa ( $M_{SUB}$ ), cada amostra foi acondicionada em recipiente polimérico, e estocada em ultrafreezer da marca Coldlab (Figura 17) modelo CL580-86V, a uma temperatura de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  para a paralisação das reações de hidratação. 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 18), 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 é capaz de atingir uma pressão de  $80\text{ }\mu\text{m Hg}$ . O uso desse equipamento tem como intuito impedir a ocorrência de qualquer reação da água com as fases anidras contidas na amostra, visto que o processo de secagem é a sublimação, ou seja, a água passa do estado sólido para o gasoso.

Figura 17: Ultrafreezer utilizado para a paralisação das reações de hidratação das amostras de argamassas.



Fonte: A autora.

Figura 18: Liofilizador utilizado para a secagem, por sublimação, das amostras de argamassas.



Fonte: A autora.

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

A porosidade aparente das diferentes amostras de argamassa foi determinada por meio da Equação 2, adaptada da ASTM C20 (2010).

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

Equação 2

Onde:

P – Porosidade aparente (%);

M<sub>SSS</sub> – Massa saturada superfície seca (g);

M<sub>S</sub> – Massa seca (g);

M<sub>SUB</sub> – Massa submersa (g).

### 3.3.5 Variação unidimensional das argamassas

O ensaio de variação unidimensional foi realizado durante 70 dias, em pórtico comparador de comprimento (extensômetro), equipado com um relógio de resolução de 0,001 mm (Figura 19), conforme as diretrizes da ABNT NBR 13583:2014 – Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio.

Os corpos de prova foram tomados um a um e medidos no extensômetro, sempre na mesma posição relativa, com seu resultado devidamente registrado, dentro de no máximo 5 minutos. A realização das leituras, nos primeiros 56 dias de ensaio, quando as barras se encontravam em cura submersa, demandaram a secagem superficial prévia das barras por meio de flanela umedecida. Atentou-se para os cuidados de ajustar o comparador por meio da barra-padrão antes e depois de fazer a leitura de cada grupo de corpos de prova. Os corpos de prova foram colocados no comparador sempre com a mesma extremidade voltada para cima. As medidas do comprimento foram feitas girando-se vagarosamente os corpos de prova, anotando-se sempre a menor leitura observada. A primeira medição do comprimento das barras foi realizada logo após as primeiras 24 horas. O mesmo procedimento foi realizado todos os dias, durante 70 dias, para a medição da variação dimensional das barras de argamassa.

Figura 19: Pórtico comparador de comprimento utilizado no ensaio de variação unidimensional com corpo de prova prismático no momento da medição.



Fonte: A autora.

A variação unidimensional (Equação 3), em porcentagem, das diferentes barras de argamassa, é dada pela diferença entre o valor medido na idade correspondente, em milímetros, e a leitura inicial da mesma barra, dividida pelo seu comprimento efetivo, em milímetros, e multiplicado por 100, considerando-se que, quando positivo, implica uma expansão e quando negativo implica em retração. A retração ou expansão média é obtida pela média aritmética das variações unidimensionais individuais, em porcentagem, dos três corpos de prova ensaiados em uma série, arredondando-se sempre ao milésimo mais próximo.

$$Var\ uni = \frac{Leitura\ idade - Leitura\ inicial}{Comp\ efe} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Var uni – Variação unidimensional (%);

Leitura idade – Valor medido na idade correspondente (mm);

Leitura inicial – Leitura inicial da mesma barra (mm);

Comp efe – Comprimento efetivo (mm).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados inerentes ao planejamento experimental proposto para este trabalho e uma análise comparativa com os resultados apresentados por Santana (2017) e Rodrigues (2018).

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A resistência à compressão axial das argamassas 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, quatro 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. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão, das diferentes argamassas, em função das idades de ensaio.

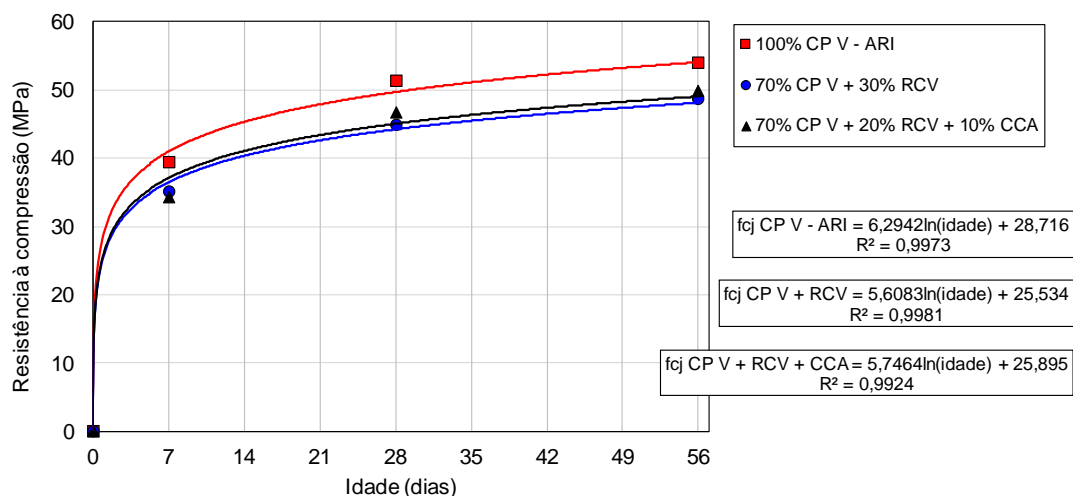
Tabela 3: Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.

Aglomerantes	Relação água/agl. (kg/kg)	Resistência à compressão (MPa)					
		7 dias		28 dias		56 dias	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
CP V - ARI	0,45	39,3	2,2	51,2	1,4	53,9	0,6
CP V + RCV		35,0	0,5	44,8	1,5	48,6	1,4
CP V + RCV + CCA		34,2	0,8	46,7	1,6	49,7	2,9

Fonte: A autora.

Na Figura 20 é apresentada a evolução da resistência à compressão das argamassas.

Figura 20: Evolução da resistência à compressão axial das diferentes argamassas moldadas na relação água/aglomerantes = 0,45.



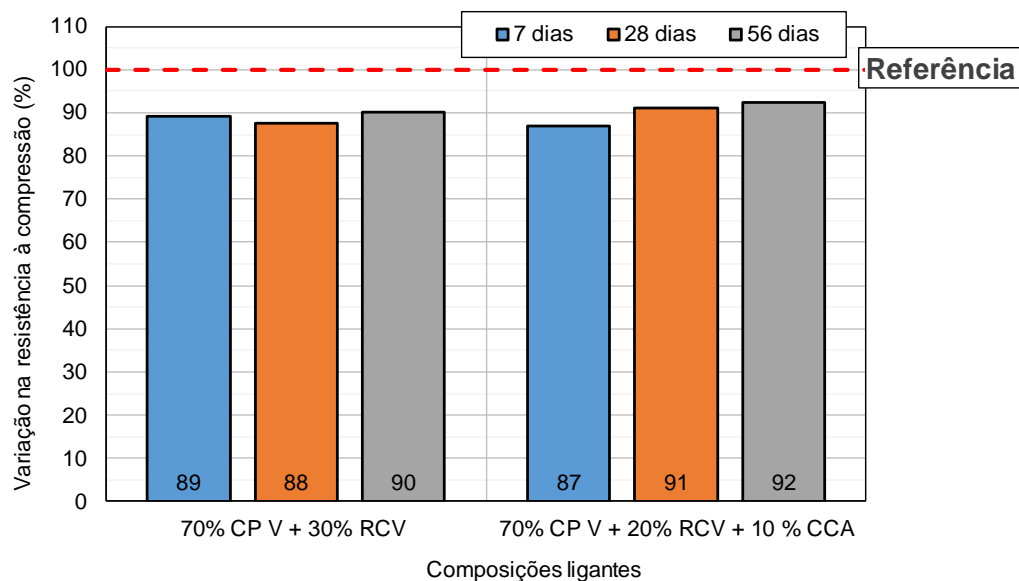
Fonte: A autora.

Os resultados apresentados na Figura 20 evidenciam que a argamassa de referência apresentou valores de resistência à compressão superiores às demais argamassas, contendo RCV, com e sem a incorporação de CCA, ao longo do período estudado. Aos 28 dias, a argamassa de cimento CP V – ARI atingiu 51,2 MPa. Na idade de 7 dias, a resistência foi de 39,3 MPa, o que representa 77% do valor observado aos 28 dias. Já aos 56 dias, a resistência de 53,9 MPa representa um incremento de 5% em relação aos 28 dias.

A substituição parcial do cimento, no teor de 30%, seja por RCV ou RCV e CCA, resultou em curvas evolutivas de resistência à compressão similares, ou seja, a retirada de uma parcela do RCV e a inclusão de CCA não impactou significativamente na resistência à compressão das argamassas. Na idade de 56 dias, as argamassas binária e ternária atingiram, em média, 49,0 MPa de resistência à compressão, valor equivalente a 91% da resistência observada na referência.

A redução percentual da resistência à compressão das misturas binária e ternária em relação à argamassa de referência é apresentada na Figura 21. A obtenção dos valores percentuais, para cada idade de avaliação, foi realizada por meio da relação entre a resistência à compressão da argamassa contendo adição(ões) mineral(ais) e a resistência da argamassa de referência. Desta forma, independentemente da idade, a argamassa de referência assume o valor de 100%, evidenciando o efeito, de forma percentual, das adições sobre esta propriedade mecânica.

Figura 21: Variação percentual, nas diferentes idades, da resistência à compressão das argamassas contendo RCV e RCV+CCA em relação às respectivas argamassas de referência.



Fonte: A autora.

Na análise dos resultados da Figura 21, observa-se que a substituição de 30% do cimento por RCV causou redução média de 11% na resistência à compressão, haja vista a resistência à compressão representar, para as idades em estudo, valores entre 88 e 90% daqueles representativos da argamassa de referência. Quando da utilização de 20% de RCV e 10% de CCA em substituição de 30% de cimento, a redução média na resistência à compressão foi de 10% durante o período de tempo analisado. Cabe ressaltar que no caso da mistura ternária, a relação percentual da resistência à compressão em relação à argamassa de referência apresentou comportamento crescente, ou seja, o decréscimo percentual na resistência foi sendo mitigado com o avançar do tempo, variando de 87 a 92%.

Diante dos resultados, fica evidente que a substituição de 30% do cimento por RCV, com e sem a utilização de CCA, reduziu, de forma geral, a resistência à compressão em 10%, independentemente da idade de análise. Portanto, a redução de 30% no consumo de cimento por meio da adição de RCV, com e sem o uso de CCA, implica em redução aceitável da resistência à compressão diante da possibilidade de destinação adequada de resíduos provenientes de outros setores agroindustriais.

Em suma, a utilização do RCV, com ou sem a adição de CCA, reduziu a resistência à compressão em 10%, em média, do teor de 30% de substituição parcial do cimento.

## 4.2 POROSIDADE DAS ARGAMASSAS

Os valores decorrentes do ensaio de porosidade aparente das argamassas, nas diferentes idades estudadas, são apresentados na Tabela 4. A porosidade inicial teórica foi determinada por meio da relação entre o volume de água de mistura e o volume total da argamassa. O volume total contempla o volume de água, o volume de agregado miúdo e o volume do aglomerante, com as devidas considerações quando da presença de RCV e CCA.

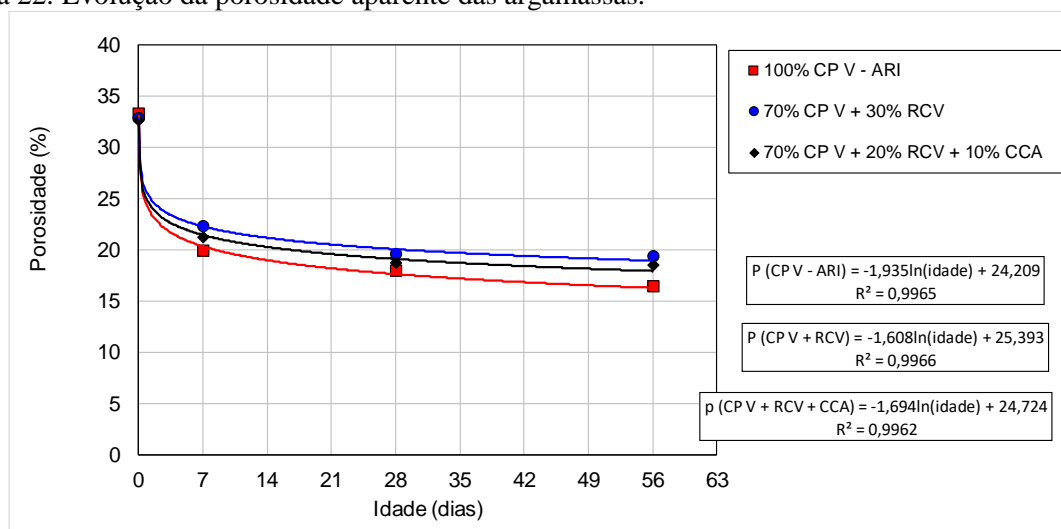
Tabela 4: Resultados do ensaio de porosidade das argamassas contendo RCV e RCV + CCA.

Aglomerantes	Relação água/agl. (Kg/Kg)	Porosidade inicial teórica (%)	Porosidade (%)					
			7 dias		28 dias		56 dias	
			Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
CP V - ARI		33,2	19,9	1,4	17,9	1,4	16,4	1,5
CP V + RCV	0,45	32,8	22,3	2,0	19,6	1,7	19,3	1,2
CP V + RCV + CCA		32,6	21,2	1,8	18,7	1,8	18,4	1,4

Fonte: A autora.

Imediatamente após a mistura, as reações de hidratação que se sucedem propiciam a formação de compostos hidratados que reduzem a porosidade ao longo do tempo. A porosidade inicial teórica das argamassas são praticamente as mesmas, com singela redução nas argamassas contendo RCV, com e sem a presença de CCA, em comparação à argamassa de referência. Essa pequena redução decorre da substituição em massa que, em decorrência da menor massa específica das adições minerais em relação ao cimento, resulta em aumento no volume do aglomerante, impactando na porosidade inicial teórica. As evoluções da porosidade aparente, ao longo do tempo, das diferentes argamassas são apresentadas na Figura 22.

Figura 22: Evolução da porosidade aparente das argamassas.



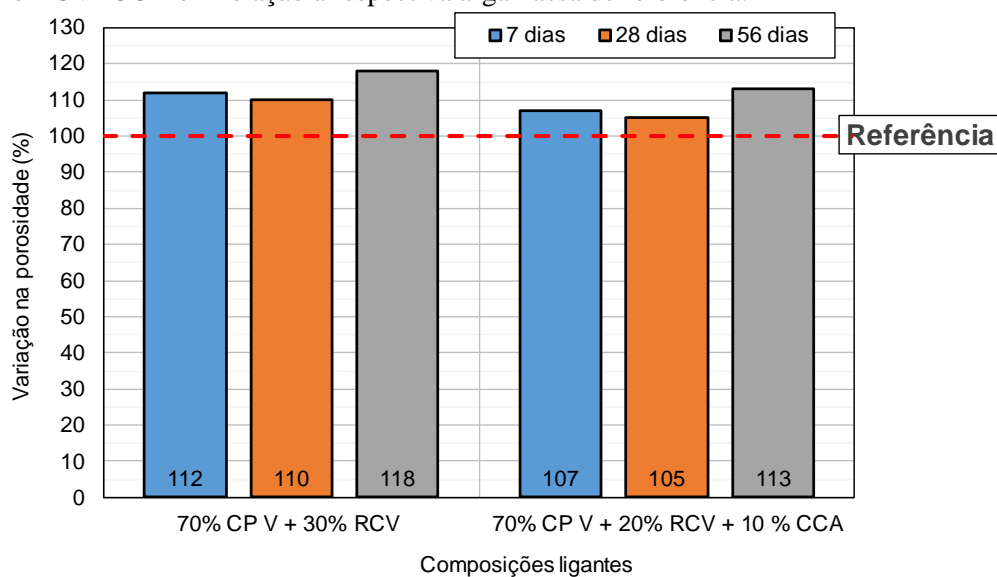
Fonte: A autora.

A argamassa de referência apresentou, independentemente da idade de análise, porosidade aparente menor que às observadas nas argamassas que contêm adição mineral. Portanto, a redução no teor de cimento na composição do aglomerante implica em aumento da porosidade. Essa tendência comportamental deve ser analisada com ressalvas, pois ao considerar o desvio padrão inerente ao ensaio, pode-se inferir igualdade entre as argamassas estudadas. Assim sendo, e baseado única e exclusivamente na média dos resultados em cada idade de análise, infere-se menor porosidade na argamassa de referência quando comparada às demais argamassas.

A substituição parcial do cimento, no teor de 30%, por RCV e CCA, resultou em curva evolutiva de menor porosidade se comparada à argamassa produzida com substituição parcial do cimento por RCV. Na idade de 56 dias, as porosidades das argamassas binária e ternária atingiram valores médios de 19,3 e 18,4%, respectivamente, enquanto a argamassa de referência apresentou 16,4%.

O aumento percentual da porosidade das misturas binária e ternária em relação à argamassa de referência é apresentado na Figura 23. A obtenção dos valores percentuais, para cada idade de avaliação, foi realizada por meio da relação entre a porosidade da argamassa contendo adição(ões) mineral(ais) e a porosidade da argamassa de referência. Desta forma, independentemente da idade, a argamassa de referência assume o valor de 100%, demonstrando o efeito, de forma percentual, das adições sobre esta propriedade.

Figura 23: Variação percentual, nas diferentes idades, da porosidade das argamassas contendo RCV e RCV+CCA em relação à respectiva argamassa de referência.



Fonte: A autora.

A partir da análise dos resultados da Figura 23, pode-se observar que a substituição de 30% do cimento por RCV causou um aumento médio de 13,3% na porosidade, haja vista a porosidade representar, para as idades em estudo, valores entre 110 e 118% daqueles representativos da argamassa de referência. Quando da utilização de 20% de RCV e 10% de CCA, em substituição de 30% de cimento, o aumento médio na porosidade foi de 8,3% durante o período de tempo analisado, apresentando valores entre 105 e 113%.

Portanto, a retirada de uma parcela do RCV e a inclusão de CCA para a produção das argamassas resultou em um aumento menos expressivo da porosidade se comparado às argamassas produzidas com substituição do cimento por RCV. Logo, a incorporação de RCV ou RCV e CCA na produção das argamassas resultaram em aumento da porosidade.

### 4.3 RELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *VERSUS* POROSIDADE

Metha e Monteiro (1994) propuseram um modelo matemático que relaciona a resistência à compressão com a porosidade. Tal modelo segue um comportamento exponencial, representado pela Equação 4. De acordo com os autores, os vazios são prejudiciais de forma que, quanto maior a porosidade, menor será a resistência, ou seja, a resistência à compressão está inversamente relacionada à porosidade da matriz hidratada.

$$S = S_0 e^{-kp}$$

Equação 4

Onde:

S – Resistência à compressão (MPa);

$S_0$  – Resistência à compressão considerando a porosidade zero (MPa);

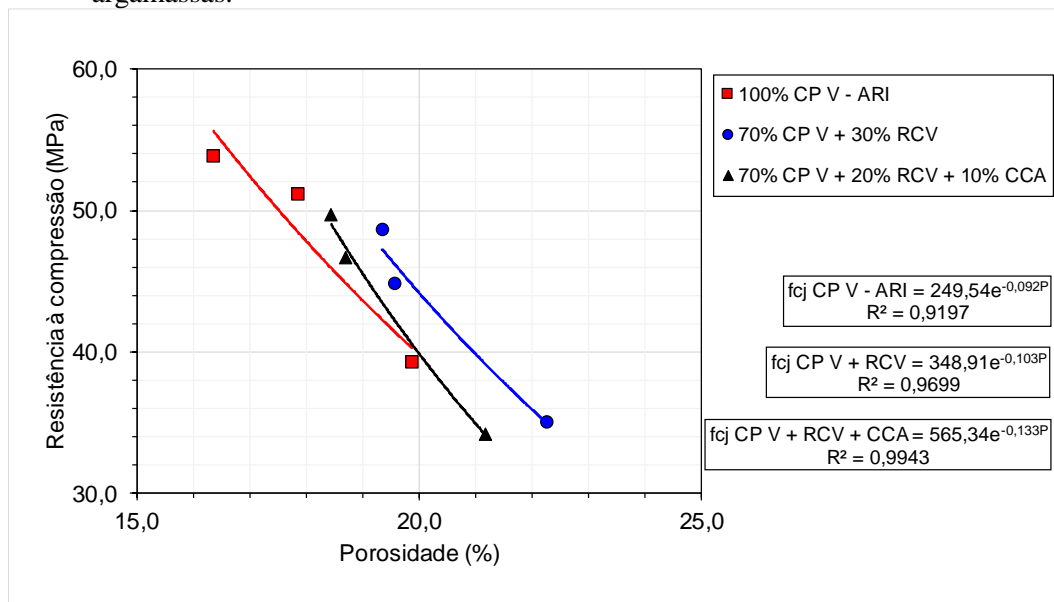
p – Porosidade (%);

k – Constante.

O modelo proposto pelos autores foi aplicado nos resultados deste trabalho, obtendo-se coeficientes de determinação ( $R^2$ ) iguais a 0,92; 0,97 e 0,99 para as curvas de tendência das argamassas de referência, de CP V – ARI + RCV e CP V – ARI + RCV + CCA, respectivamente, o que comprova que os dados experimentais se ajustam ao modelo matemático teórico.

Na Figura 24 são apresentadas as curvas que relacionam a resistência à compressão em função da porosidade para cada composição de argamassa estudada.

Figura 24: Relação resistência à compressão *versus* porosidade das diferentes composições de argamassas.



Fonte: A autora.

Através da curva que representa a argamassa de referência, é possível constatar que a redução da porosidade em 3,5% (de 19,9% para 16,4%) implica em aumento da resistência

à compressão de 14,6 MPa (de 39,3 MPa para 53,9 MPa). A partir desses resultados obtém-se o índice de 4,2 MPa/unidade de porosidade reduzida.

A análise da curva que caracteriza a mistura de CP V – ARI + RCV permite observar que quando a porosidade é de 22,3% a resistência equivalente é de 35 MPa. Essa resistência é elevada para 48,6 MPa quando a porosidade é reduzida para 19,3%. Ou seja, para uma redução de 3,0% na porosidade, há um aumento de 13,6 MPa na resistência, o que equivale a um índice de 4,5 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 30% RCV implica em maior incremento na resistência à compressão em relação à argamassa executada somente com cimento Portland.

A curva que reproduz os resultados experimentais da argamassa produzida por CP V – ARI + RCV + CCA, atesta que a redução da porosidade em 2,8% (de 21,2% para 18,4%) provoca aumento da resistência à compressão de 15,5 MPa (de 34,2 MPa para 49,7 MPa). Obtém-se, portanto, um índice de 5,5 MPa/unidade de porosidade reduzida, ou seja, para uma redução 2,8% na porosidade ocorreu um aumento de 15,5 MPa na resistência, valor superior ao obtido na argamassa de referência (4,2 MPa) e na argamassa contendo CP V + RCV (4,5 MPa). Logo, a redução de uma unidade percentual na porosidade da argamassa composta por CP V – ARI + RCV + CCA resulta em maior incremento na resistência à compressão em relação às argamassas executadas somente com cimento Portland ou com adição de RCV apenas.

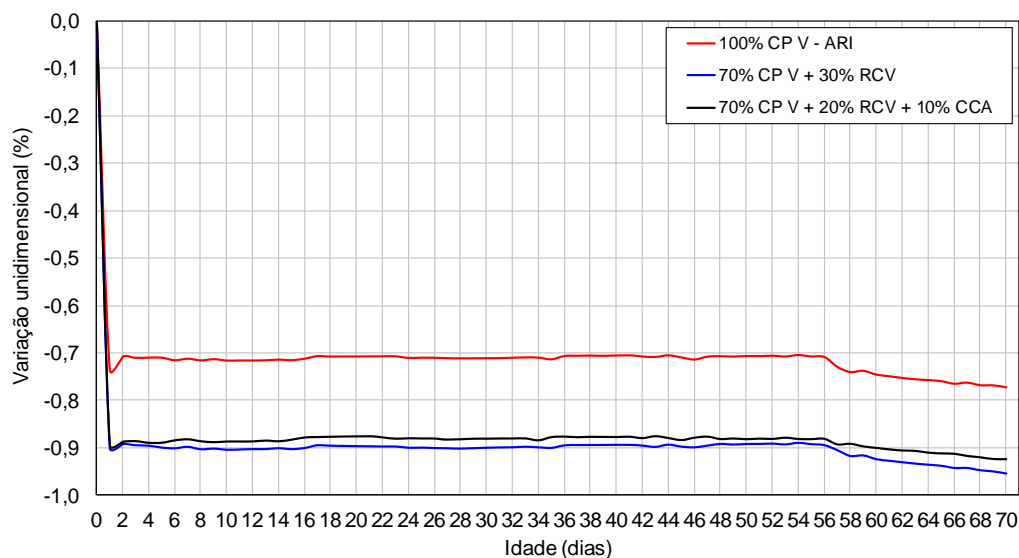
Verifica-se, portanto, através da Figura 24 que a presença do RCV na composição do cimento Portland tende a majorar o incremento da resistência à compressão quando da redução de uma unidade percentual de porosidade. Também fica evidente que a utilização da mistura ternária (cimento + RCV + CCA) resulta em maior incremento da resistência à compressão.

#### **4.4 VARIAÇÃO UNIDIMENSIONAL**

A variação unidimensional das argamassas foi avaliada durante 70 dias. A determinação da retração ou expansão, em cada idade, foi realizada por meio da média aritmética dos resultados obtidos no ensaio de, no mínimo, três corpos-de-prova. As curvas de variação unidimensional para cada composição de argamassa estudada, são apresentadas

na Figura 25. Cabe salientar que nesta figura, cada curva representa a média dos resultados obtidos tomando como referência inicial a idade de moldagem das argamassas.

Figura 25: Variação unidimensional das diferentes argamassas em estudo, considerando como referência inicial a idade de moldagem das argamassas.



Fonte: A autora.

Da análise da Figura 25 percebe-se que a maior retração das argamassas ocorre nas primeiras horas de hidratação, até a idade de 1 dia.

É importante ressaltar que, após a moldagem dos corpos de prova, mesmo recobertos com filme polimérico, há possibilidade de perda de água por evaporação e, conseqüentemente, assim que submetidos à cura submersa, podem apresentar expansão inicial devido à absorção de água até a completa saturação. Esse comportamento é apresentado nas diferentes argamassas estudadas quando analisados os primeiros 2 dias.

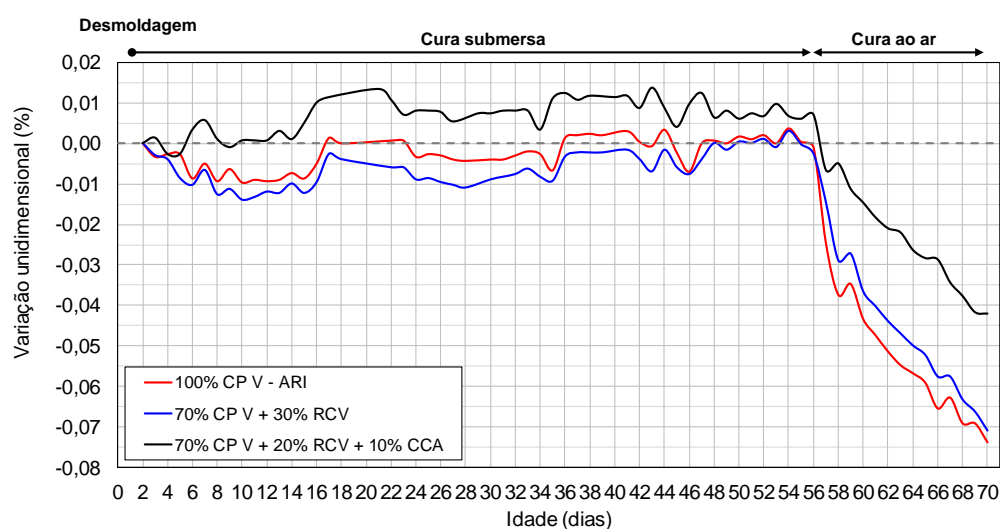
Após o segundo dia, as argamassas apresentam comportamento cíclico, de expansões e retrações, até a idade de 47 dias. Na sequência desta idade, até 56 dias, quando do término da cura úmida, as variações unidimensionais pouco variaram. Quando da exposição dos corpos de prova à ambiente laboratorial, foi observada a retração por secagem até 70 dias.

Neste cenário, aparenta que a argamassa contendo RCV, aos 70 dias, apresentou a maior retração entre as composições estudadas, seguido da mistura ternária, composta por cimento, RCV e CCA e por fim da argamassa de referência, com menor retração. Essa tendência deve ser observada com cautela, haja vista a expansão inicial decorrente da submersão em água com cal impactar significativamente no comportamento ao longo do

tempo. Assim sendo, de fato, a análise comparativa apresentada não considera uma mesma condição inicial, pois imediatamente após a desmoldagem a condição de saturação das barras, das diferentes composições aglomerantes, diferia entre si.

Com o objetivo de eliminar essa discrepância, realizou-se a análise considerando como medida inicial de referência a idade de 2 dias, momento em que as diferentes argamassas encontravam-se em condição saturada. A alteração no comportamento decorrente desta consideração é apresentada na Figura 26.

Figura 26: Variação unidimensional das diferentes argamassas em estudo, considerando como referência inicial a idade de 2 dias das argamassas, visando desconsiderar a expansão por restauração.



Fonte: A autora.

Os resultados apresentados na Figura 26 evidenciam que a argamassa de referência e a argamassa contendo 30% de RCV em sua composição, quando em cura submersa, apresentaram comportamento cíclico, caracterizado por retração inicial até a idade de 15 dias. A partir desta idade houveram variações unidimensionais, caracterizadas por sucessivas compensações retracionais seguidas de retrações até 47 dias. Nas idades subsequentes (até 56 dias), o comportamento observado foi de estabilidade dimensional, sem a ocorrência de retração ou expansão. Quando submetidas à cura em ambiente laboratorial, a utilização do RCV contribuiu na redução da retração por secagem até a idade de 70 dias.

A argamassa ternária, apesar de também apresentar comportamento de variação unidimensional cíclico, caracterizou-se, predominantemente, pela expansão do material ao longo do tempo quando em cura submersa, apresentando pequeno intervalo de retração entre 3 e 5 dias. Quando submetidas à cura em ambiente laboratorial, a argamassa contendo RCV

e CCA em sua composição, apresentou menor retração por secagem, seguida da argamassa contendo RCV e, por fim, com a maior retração, a argamassa de referência.

#### **4.5 ANÁLISE COMPARATIVA COM OS ESTUDOS DE SANTANA (2017) E RODRIGUES (2018)**

A seguir será apresentada uma análise comparativa com os resultados de resistência à compressão axial e porosidade expostos por Santana (2017), a qual fez uso de RCV com partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$ , e Rodrigues (2018), a qual produziu argamassas compostas por RCV com partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$  e CCA, nos mesmos teores deste trabalho.

##### **4.5.1 Resistência à compressão axial**

A Figura 27 apresenta os percentuais de resistência à compressão axial das argamassas contendo RCV, em substituição parcial ao cimento Portland, em relação às respectivas argamassas de referência, para a relação água/aglomerante de 0,45, nas idades de 7, 28 e 56 dias. Cabe salientar que as argamassas dos estudos são diferentes, sobretudo na marca e tipo de cimento Portland. As argamassas produzidas por Santana (2017) utilizaram cimento da marca Ciplan, do tipo CP II – Z – 32, com substituição do cimento por 25% de RCV. As argamassas produzidas por Rodrigues (2018), com substituição parcial do cimento por 20% de RCV e 10% de CCA, tiveram em sua composição o CP V – ARI, da marca Campeão.

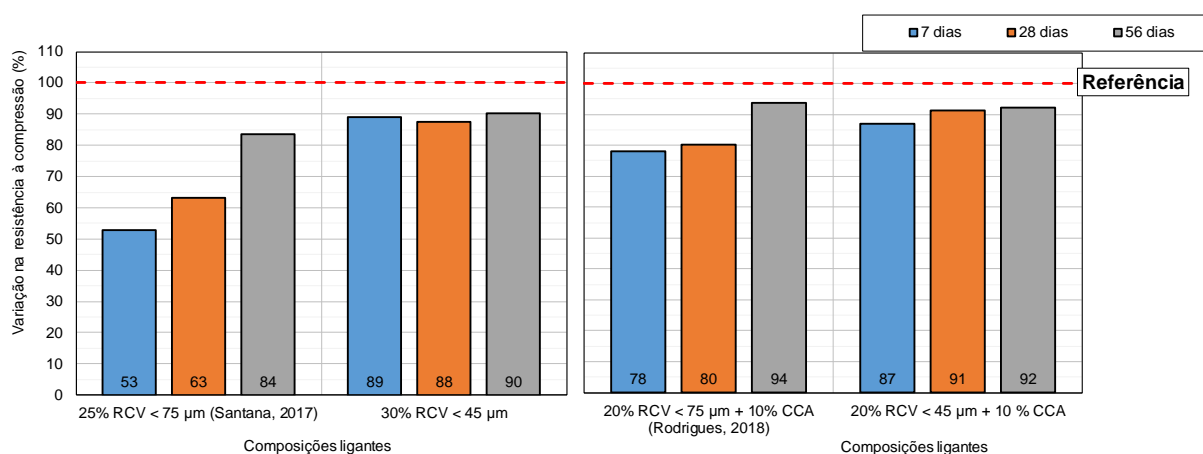
Em virtude deste fato, os valores de resistência à compressão não podem ser diretamente comparados sendo, portanto, analisados em termos relativos, via percentual em relação às respectivas argamassas de referência. Convém salientar que o presente estudo fez uso de 30% de RCV na composição do material cimentício da primeira mistura, para comparação com a mistura realizada por Santana (2017), a qual fez uso de 25% de RCV em substituição ao cimento, e 20% RCV + 10% de CCA na segunda mistura, para comparação com o estudo de Rodrigues (2018).

Santana (2017) constatou que a mistura binária, composta por cimento Portland e RCV, na proporção de 25% e com partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$ , resultou em redução da resistência à compressão. Porém, como o RCV utilizado nesse estudo possui partículas inferiores a 45  $\mu\text{m}$ , e segundo Garcia *et al.* (2015), as partículas com dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$  são capazes de apresentar reatividade suficiente para atribuir-lhes pozolanicidade, foi

realizada a mistura com uma maior porcentagem (30%) de RCV para avaliar seu comportamento.

A CCA foi introduzida, na segunda mistura, em virtude da sua alta capacidade de fixar cal por atividade pozolânica, para compensar a menor reatividade do RCV. Cabe destacar que a CCA utilizada neste trabalho foi semelhante à utilizada por Rodrigues (2018), portanto, a diferença está na marca do cimento Portland e no RCV utilizado.

Figura 27: Análise comparativa da resistência à compressão percentual das argamassas contendo RCV, com diferentes teores, em relação às respectivas argamassas de referência.



Fonte: A autora.

A partir da análise da Figura 27, verifica-se que na idade de 7 dias, a utilização de 25% RCV < 75 µm, conforme Santana (2017), causou significativa redução na resistência à compressão em comparação à referência, com valor percentual de 47%. Os resultados deste estudo, com 30% RCV < 45 µm, para a mesma idade, indicam que a mistura provocou redução da resistência à compressão, somente de 11%, quando comparado ao valor de referência. Porém, quando comparado com a mistura de Santana (2017), a mistura deste estudo obteve 36% a mais de resistência com maior quantidade de cimento substituída.

Nas idades de 28 e 56 dias as reduções na resistência apresentadas no estudo de Santana (2017) foram de 37% e 16%, respectivamente, enquanto que no presente trabalho as reduções, para as mesmas idades, foram de 12% e 10%, respectivamente. Quando comparado ao estudo de Santana (2017), os resultados deste trabalho representam, nas idades de 28 e 56 dias, aumento das resistências em 25% e 6% respectivamente. Esse aumento se justifica pela finura do RCV e pelo tipo de cimento utilizado neste estudo.

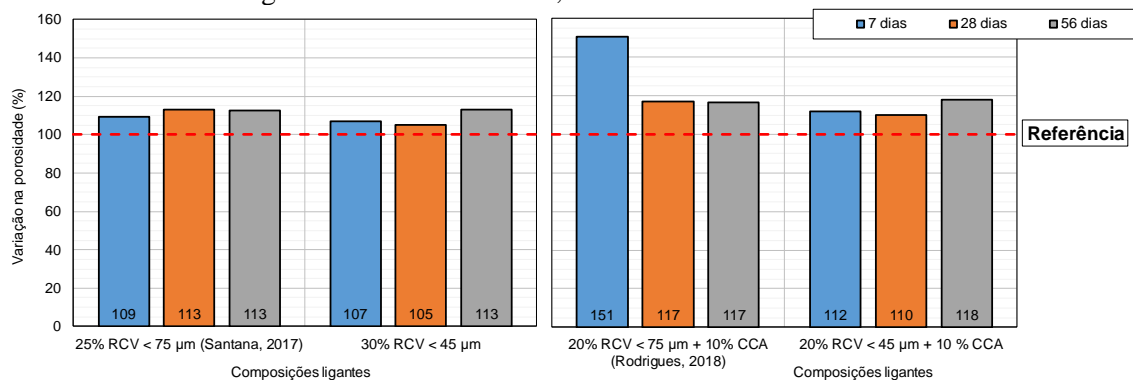
Como observado na Figura 27, na idade de 7 dias, a utilização de 20% RCV < 75 µm e 10% CCA, conforme Rodrigues (2018), causou redução da resistência à compressão em comparação à respectiva referência, tal que a redução na resistência foi de 22%. Os resultados deste estudo, para a mesma idade, indicam que a mistura ternária resultou em redução da resistência à compressão de 13% quando comparado ao valor de referência. Porém, quando comparado com a mistura de Rodrigues (2018), a mistura ternária deste estudo obteve 9% a mais de resistência com a mesma quantidade de cimento substituída. Já na idade de 28 dias, a redução na resistência apresentada no estudo de Rodrigues (2018) foi de 20%, enquanto que, no presente trabalho, a redução foi de 9%.

Na idade de 56 dias, as reduções das duas misturas tiveram uma diferença de somente 2%. Desta forma, fica evidente que a presença de RCV mais fino, nas misturas binária e ternária deste trabalho, representou maior aumento na resistência à compressão nas primeiras idades (7 e 28 dias), quando comparado às misturas de Santana (2017) e Rodrigues (2018). Aos 56 dias, a resistência à compressão da argamassa contendo 25% de RCV, relacionada ao estudo de Santana (2017), apresentou 6% de diferença no valor percentual em relação ao presente estudo. Tal fato se deve, preponderantemente ao tipo de cimento Portland utilizado, ou seja, CP II – Z utilizado por Santana (2017) e CP V – ARI utilizado no presente estudo. No tocante à mistura ternária, aos 56 dias, pode se afirmar que a finura do RCV não influenciou significativamente na redução percentual da resistência à compressão.

#### 4.5.2 Porosidade de argamassas

As variações da porosidade no tempo de estudo são apresentadas na Figura 28.

Figura 28: Porosidade das argamassas contendo RCV, em diferentes teores.



Fonte: A autora.

A partir da Figura 28 é possível perceber que, tanto as misturas produzidas por Santana (2017) e Rodrigues (2018), quanto as misturas produzidas neste trabalho, sofreram aumento da porosidade quando da utilização de RCV, com ou sem a presença de CCA, em substituição parcial ao cimento Portland.

A variação percentual da porosidade aparente em relação às respectivas referências, evidenciou que, aos 7 dias, no trabalho de Santana (2017), houve aumento de 9% em relação à argamassa de referência. No presente estudo esse aumento de porosidade foi de 12%. Para as idades de 28 e 56 dias, o aumento na porosidade, constatado por Santana (2018) foi de 13%, enquanto que, na presente pesquisa, esses valores foram de 10% e 18%. O aumento percentual médio da porosidade nas argamassas produzidas por Santana (2017), foi de 11,6%. Já o aumento constatado no presente trabalho foi, em média, 13,3%. Esse comportamento médio se justifica, sobretudo pelo maior teor de RCV na composição do aglomerante, sendo utilizado 30% no presente estudo, enquanto que Santana (2017) utilizou 25%.

Em termos de variação percentual relacionado à mistura ternária, aos 7 dias, o aumento na porosidade constatado por Rodrigues (2018) foi de 51% em relação à sua argamassa de referência. No presente estudo esse aumento de porosidade foi de 7%. Para as idades seguintes, 28 e 56 dias, o aumento na porosidade, constatado por Rodrigues (2018), foi de 17% para ambas as idades. Já na presente pesquisa, esses valores foram de 5% e 13%, respectivamente. Convém salientar que o estudo de Rodrigues (2018) fez uso de cimento Portland do tipo CP V – ARI, o mesmo tipo de cimento utilizado no presente estudo, porém de marcas diferentes.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho, é possível apresentar as seguintes considerações finais:

1. A substituição parcial do cimento Portland por RCV, com partículas inferiores a 45  $\mu\text{m}$ , reduziu a resistência à compressão da argamassa. A redução média na resistência à compressão foi de 11% para um teor de substituição de cimento de 30%.
2. A mistura ternária, contendo 20% de RCV e 10% de CCA, sendo a CCA, em decorrência da sua alta reatividade, utilizada com o objetivo de mitigar a redução na resistência à compressão observada na mistura binária, não impactou significativamente nos resultados. A redução média na resistência à compressão foi de 10% para um teor de substituição de cimento de 30%.
3. A utilização de CCA em substituição parcial ao RCV na proporção de 1,0:2,0, não impactou nos resultados de resistência à compressão. Assim sendo, pode-se afirmar que a utilização de RCV com partículas inferiores a 45  $\mu\text{m}$  apresenta desempenho similar ao da mistura ternária, contendo CCA, uma pozolana de alta reatividade.
4. As argamassas contendo RCV, com e sem a utilização de CCA, apresentaram aumento da porosidade aparente ao longo do tempo quando comparadas à argamassa de referência. A inclusão ou não da CCA, compondo misturas ternária e binária, respectivamente, não impactou significativamente no volume de vazios contido nestas argamassas.
5. O aumento percentual da porosidade aparente das argamassas contendo RCV, com e sem a utilização de CCA, foi inferior ao teor de substituição de 30%, representado por um percentual médio de 10%.
6. A variação unidimensional, considerando como referência a idade de moldagem das argamassas, evidenciou que as argamassas, ao resaturarem, apresentaram expansão. Após a resaturação, as argamassas apresentaram um período característico de retração e, posteriormente, uma etapa cíclica, com aumento e diminuição dimensional. O comportamento apresentou certo equilíbrio entre 47 e 56 dias. A retração por secagem, iniciada aos 56 dias, evidenciou maior retração da argamassa contendo RCV, seguida da argamassa contendo RCV e CCA e, por fim, da argamassa de referência.

7. A variação unidimensional, considerando como referência a idade de 2 dia, quando da resaturação das argamassas, evidenciou que a presença de RCV na composição aumentou a retração da argamassa, até a idade de 47 dias, em comparação com a argamassa de referência. A partir desta idade até 56 dias, o comportamento foi similar, com tendência de extinção da retração. A inclusão da CCA na argamassa contendo RCV resultou, predominantemente, em expansão das barras até a idade de 56 dias. A exposição ao ambiente laboratorial evidenciou que a argamassa contendo RCV e CCA foi a que apresentou a menor retração, seguida pela argamassa contendo RCV e, com a maior retração, a argamassa de referência.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Considerar a possibilidade de reduzir a relação água/cimento, nos mesmos teores de substituição estudados, para compensar a redução da resistência à compressão axial das argamassas e equiparar a porosidade e avaliar os efeitos sobre a variação unidimensional;
- Estudar a influência da incorporação de RCV, com ou sem CCA, na resistência à tração de argamassas;
- Avaliar os efeitos da incorporação de RCV na durabilidade de argamassas.

## 7. REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. **NBR 13583 – Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio.** Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

ALCANTARA, P. S. X., NÓBREGA, A. C. V. **Desenvolvimento de argamassas para revestimento utilizando resíduos de cerâmica vermelha de Caruaru/PE como material pozolânico e/ou agregado alternativo.** Trabalho de Conclusão de Curso. Caruaru-PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

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.

ALMEIDA, Jacinto. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz.** 2017. Dissertação (Doutor em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA, **Dados do Setor,** <<http://www.anicer.com.br>>, consultado em 22/12/2018.

BARBOSA, K.C. **Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenaria de blocos de concreto.** São Carlos, 2005. 233 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de São Carlos.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento.** Dissertação de Mestrado. Campina Grande: Universidade Estadual de Campina Grande, 2010.

Bui D.D., **Rice husk ash as a mineral admixture for high performance concrete,** PhD thesis, Netherland: Delft University of Technology; 2001.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Disponível em <<http://www.cbicdados.com.br>>. Acessado em 17/12/2018.

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.

CARDOSO, J. T. de O., FORTI, N. C. da S. **Estudo para a aplicação de resíduos de cerâmica vermelha na produção de argamassas cimentícias**. XX Encontro de Iniciação Científica – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2015.

Cimento.Org. Disponível em: <<https://cimento.org/cimento-no-brasil/>>. Acesso em: 10 dez. 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) – **Perspectivas para a agropecuária**. Disponível em <<http://www.conab.gov.br>>. Acessado em: 20/12/2018.

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.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados conjunturais da produção de arroz (*Oryza sativa* L.) no Brasil (1986 a 2017): área, produção e rendimento**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2018. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>>. Acesso em: 10/01/2019.

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.

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.

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

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

HOPPE FILHO, Juarez et al. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 168-177, abr. 2015.

Huang, H., & Ye, G. (2016). Use of rice husk ash for mitigating the autogenous shrinkage of cement pastes at low water cement ratio. In E. Fehling, B. Middendorf, & J. Thiemicke (Eds.), *Ultra-high performance concrete and high performance construction materials: Proceedings of HiPerMat 2016, Kassel, Germany (27 ed., Vol. 27, pp. 1-8)*. Kassel: Kassel University Press.

INSTITUO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE) – **Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação.** <<http://www.ibge.gov.br>>, consultado em 17/12/2018.

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

LEMES, Silênia Priscila da Silva. **Análise de Desempenho em Argamassa de Assentamento e de Revestimento com Incorporação de Cinza de Casca de Arroz em Alvenaria de Bloco Estrutural e de Vedação.** 2013. 91 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil)- Unipampa, Alegrete, 2013.

MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in concrete technology. Volume 1, Canadá, 1996.

MEDEIROS, M. H. F., SOUZA, D. J., HOPPE FILHO, J., ADORNO, C. S., et al. **Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica**. Revista Matéria, v. 21, n.2, p.282 - 300 Rio de Janeiro, 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, 2017**. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/>>. Acessado em 22/12/2018.

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.**

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed., Ed. Pini, São Paulo, 2015.

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.

PONTES, J. M. P. do N., **Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões**. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2011.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese de doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

QUEIROZ NETO, M. L., MEDEIROS, M. K. S., FLORÊNCIO, F. D. C., SOUZA JUNIOR, P. L. **Geração de resíduo sólido proveniente da fabricação de cerâmica vermelha: caso de indústria cerâmica na região de Assú/RN**. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campina Grande, 2016.

RASOUL, Benyamin et al. **INFLUENCE OF RICE HUSK ASH (RHA) ON THE DRYING SHRINKING OF MORTAR**. *European Chemical Bulletin*, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 115-119, jun. 2018.

RODRIGUES, R. L. G. **Resistência à compressão e porosidade de argamassa com substituição parcial do cimento portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e**

**cinza de casca de arroz (CCA).** 2018. 85 p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil)- UFOB, Barreiras, 2018.

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.

SANTANA, R. L. **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. Barreiras: Universidade Federal do Oeste da Bahia, 2017.

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

SEBRAE/ESPM. **Cerâmica Vermelha. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM – Relatório Completo.** Sebrae Nacional, São Paulo, 2008.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Resultados preliminares de 2017.** Disponível em < <http://snic.org.br/> >, acessado em 17/12/2018.

SILVA, Natassia. **Estudo da adição de cinza de casca de arroz em peças de concreto para pavimentação intertravada.** 2015. Artigo (Bacharel em Engenharia Civil) - UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense, [S. l.], 2015.

SOUZA, F. B. de., NETTO, A. L. R., SILVA, D. dos S. da., SILVA, B. do V. **Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento portland por cinza da casca de arroz.** Revista Iniciação científica, v.12, n 1, 2014.

SOUZA, Felipe *et al.* **Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento portland por cinza da casca de arroz.** Iniciação científica, criciúma, santa catarina, n. 1, p. 5-18, 10 fev. 2019.

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.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2006.

TASHIMA, Mauro Mitsuchi et al. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 151-163, jun. 2012.

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.