



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

PALOMA SANTOS XAVIER DE ALCANTARA

**Desenvolvimento de argamassas com adição de resíduo de cerâmica vermelha para  
aplicação no cotidiano de obras**

Caruaru, 2012

PALOMA SANTOS XAVIER DE ALCANTARA

**Desenvolvimento de argamassas com adição de resíduo de cerâmica vermelha para aplicação no cotidiano de obras**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia/Engenharia Civil/Construção Civil

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Caruaru, 2012

Catálogo na fonte

Bibliotecária Simone Xavier CRB4 – 1242

A347d Alcantara, Paloma Santos Xavier de.

Desenvolvimento de argamassas com adição de resíduo de cerâmica vermelha para aplicação no cotidiano de obras. / Paloma Santos Xavier de Alcantara. - Caruaru: O Autor, 2012.

52f; il.; 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Argamassa. 2. Cerâmica vermelha. 3. Resíduos. 4. Construção civil. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da. (orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2013-22)

PALOMA SANTOS XAVIER DE ALCANTARA

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE  
CERÂMICA VERMELHA PARA APLICAÇÃO NO COTIDIANO DE OBRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil do Centro  
Acadêmico do Agreste - CAA, da  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE,  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia/Engenharia  
Civil/Construção Civil

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato  
ALUNO(A) APROVADO COM NOTA\_\_\_\_\_.

Caruaru, 08 de março de 2013.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cecília Vieira da Nóbrega \_\_\_\_\_  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Érika Pinto Marinho \_\_\_\_\_  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dr. Flávio Eduardo Gomes Diniz \_\_\_\_\_  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Elder Alpes de Vasconcelos \_\_\_\_\_  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

*Dedico este trabalho a minha amada avó,  
Irene Xavier, cuja lembrança e ensinamentos  
levarei eternamente.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço acima e antes de tudo aos meus pais, Adilson Xavier de Alcantara e Marineide Santos Xavier de Alcantara, por todo esforço, carinho, amor, dedicação, incentivos a mim dedicados. Por me ensinarem que para conquistar vitórias é preciso ser perseverante e ter disciplina, andar por caminhos sinceros, éticos e honestos com a cabeça erguida.

Aos meus familiares que de alguma maneira me ajudaram nessa caminhada.

Em especial, à professora, minha orientadora, Ana Cecília, cujas orientações foram além da academia. Agradeço pelo investimento acadêmico, pelo apoio em todos os momentos, inclusive nos mais críticos, pelo companheirismo e amizade, que contribuíram fortemente na minha formação profissional e pessoal. *Minha eterna admiração.*

A todos os professores que participaram da minha formação. Conviver diariamente com profissionais de excelência me serviu e serve de inspiração. Agradeço, além de tudo, por me apresentaram a natureza e me capacitaram a interferir nela para o bem comum.

Aos amigos que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada. Vocês foram de extrema importância. Me foram ombros, sorrisos e incentivos.

Aos amigos da RRX Construtora. Agradeço pelos ensinamentos da vida prática da construção civil, pela paciência, bem como pelo apoio e oportunidades profissionais.

Aos técnicos do Laboratório de Química (LQ) e de Sistemas Construtivos (LSC), pela atenção e ajuda nos ensaios.

Ao colega do LSC, Márcio Saraiva, pelas dicas, ajuda e companheirismo.

## RESUMO

### **Desenvolvimento de argamassas com adição de resíduos de cerâmica vermelha para aplicação no cotidiano de obras**

Baixo grau de industrialização, perdas e poucas contribuições para crescimento sustentável da indústria cerâmica vermelha (telhas e tijolos) de Caruaru-PE impulsionaram a realização deste trabalho, que visa à conformação, em argamassas de revestimento, de seus resíduos. Materiais de cerâmica vermelha, quando calcinados, têm sido avaliados com resultados promissores na literatura vigente como possíveis pozolanas. Avaliou-se então indicativamente a atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica empregando o Método Chapelle modificado (NBR 15895:2010). Foram avaliadas peças cerâmicas produzidas na indústria (850 °C e 950 °C), bem como queimadas e requeimadas de forma controlada no laboratório (850 °C, 950 °C e 1050 °C). As amostras foram capazes de fixar CaO com índices entre 207 e 311 mg/g. Microestruturalmente, há picos de minerais cristalinos como quartzo, albita e anortita, que são pouco ou não reativos na reação pozolânica. Por não atingirem o índice mínimo de consumo de 330 mg/g indicado na literatura, optou-se por substituir os agregados miúdos das argamassas pelos rejeitos de cerâmica vermelha. O traço seco em volume escolhido da argamassa foi 1:2:9 (cimento:cal hidratada:areia seca). Os teores de substituição foram de 10, 15, 20 e 30% em relação a massa do agregado. O traço em volume foi transformado para massa, sendo o fator água cimento de 3,14 (fixo em todas as substituições) para obtenção de um índice de consistência da argamassa de referência de 273,17 mm. Fez-se a comparação entre as propriedades da argamassa convencional e das desenvolvidas, através de ensaios como índice de consistência, densidade, retenção de água e resistência à compressão. No caráter prático, um mestre de obras sinalizou que todas as argamassas são trabalháveis, exceto a com 30% de substituição, única também a apresentar trincas por retração após alguns dias da aplicação. Assim, recomenda-se o teor de substituição de 20%, pois foi o que gerou resultados mais satisfatórios frente às propriedades das argamassas.

**Palavras-chave:** Argamassa. Cerâmica Vermelha. Substituição.

## **ABSTRACT**

### **Development of mortars with added residue of red ceramic for its application in daily life construction works**

Low level of industrialization, wastes and a small contribution to sustainable growth of ceramic industry (bricks and tiles) of Caruaru-PE stimulated the realization of this research, which seeks the conformation in masonry mortar, its waste, comminuted in a very fine granulometry in order to obtain the filler effect. Red ceramic materials, when sprayed, have been evaluated with promising results in the current literature as possible pozzolans. The pozzolanic activity of ceramic waste was indicatively evaluated employing the modified Chapelle Method (NBR 15895:2010). Local industry ceramics (850°C and 950°C) and laboratory controlled (re)burned (850°C, 950°C and 1050°C) were analyzed. Samples were able to fix CaO with rates between 207 and 311 mg / g. Microstructurally, there are peaks of crystalline minerals such as quartz, albite and anorthite, which are poorly or not reactive in the pozzolanic reaction. As the ceramic do not reach the minimum ratio of consumption of 330 mg / g indicated in the literature, we chose to replace the aggregates of masonry mortar by red ceramic wastes. The dry volume formulation chosen of mortars was 1:2:9 (cement:hydrated lime:dry sand). Substitution levels were 10, 15, 20 and 30% on aggregate mass. The volumetric formulation was converted to mass, and the water/cement relation was 3.14 (fixed at all substitutions) in order to obtain a consistency index of mortar reference of 273.17 mm. A comparison was made between the properties of conventional mortar and developed ones through testing as consistency index, density, water retention and compressive strength. In a practical, the foreman indicated that all mortars are workable, except with 30% substitution, also the only one that showed shrinkage cracks after a few days of application. Thus, we recommend the replacement level of 20% because it was what generated the most satisfactory results in the face of the mortar properties.

**Key words:** Mortar. Red Ceramica. Replacement.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva granulométrica da areia utilizada nas argamassas.....	21
Figura 2 - Depósito de argila.....	24
Figura 3 – Caixa alimentador.....	24
Figura 4 – Forno tipo abóbada.....	24
Figura 5 – Controle de qualidade.....	24
Figura 6 - Diferença de coloração de amostras moídas da indústria queimadas a (850°C - esquerda e 950°C - direita).....	25
Figura 7 - Curva de queima obtida nos fornos da indústria emblemática.....	26
Figura 8 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C e 950°C coletadas na indústria.....	27
Figura 9 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C , 950°C e 1050°C em laboratório.....	28
Figura 10 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C e 950°C coletadas na indústria, comparativamente as amostras queimadas nas mesmas temperaturas em laboratório e a requeimada de 850°C para 950°C.....	29
Figura 11 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para amostras requeimadas no laboratório de 850°C para 950°C, de 850°C para 1050°C e de 950°C para 1050°C.....	30
Figura 12 - DRX de amostras calcinadas a patamares de 850, 950 e 1050°C.....	31
Figura 13 - Micrografias do resíduo de cerâmica sinterizados a 850°C, 950°C e 1050°C.....	32
Figura 14 – Quantificação de fases por Rietveld para amostras calcinadas a patamares de 850, 950 e 1050 °C.....	33
Figura 15 - Aspecto final dos cps durante moldagem.....	35
Figura 16 - Aspecto final dos cps após desmoldagem, mostrando desde o referênci a e com adições de 10, 15, 20 e 30% do resíduo cerâmico, respectivamente da esquerda para a direita.....	35
Figura 17 - Consistência normal (mm) das argamassas padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30%.....	37

Figura 18 - Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) das argamassas padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30% . . . . .	38
Figura 19 - Retenção de água (%) das argamassas padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30% . . . . .	39
Figura 20 - Resistência à compressão aos 7 dias. . . . .	40
Figura 21 - Resistência à compressão aos 28 dias. . . . .	41
Figura 22 - Resistência à Compressão aos 90 dias. . . . .	41
Figura 23 - Aplicação da argamassa com teor de 10%. . . . .	42
Figura 24 - Aplicação da argamassa com teor de 15%. . . . .	43
Figura 25 - Aplicação da argamassa com teor de 20%. . . . .	43
Figura 26 - Aplicação da argamassa com teor de 30%. . . . .	44
Figura 27 - Visão geral da fixação das argamassas. . . . .	44
Figura 28 - Aspecto final da argamassa com teor de 0%. . . . .	45
Figura 29 - Aspecto final da argamassa com teor de 10%. . . . .	46
Figura 30 - Aspecto final da argamassa com teor de 15%. . . . .	46
Figura 31 - Aspecto final da argamassa com teor de 20%. . . . .	47
Figura 32 - Aspecto final da argamassa com teor de 30%. . . . .	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas do cimento. ....	19
Tabela 2 - Características físicas do cimento. ....	19
Tabela 3 - Análise química da cal hidratada. ....	20
Tabela 4 - Análise física da cal hidratada. ....	20
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia.....	21
Tabela 6 - Características físicas da areia. ....	21
Tabela 7 - Quantitativo de materiais utilizados nas formulações.....	34

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo

$M_{\text{cimento}}$  – massa de cimento

$M_{\text{areia}}$  – massa de areia

$M_{\text{cal}}$  – massa de cal

NBR – Norma Brasileira

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS</b> .....	<b>15</b>
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>166</b>
<b>2.1 OBTENÇÃO DO RESÍDUO CERÂMICO VIA INDÚSTRIA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 QUEIMA EM LABORATÓRIO PARA OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3 REQUEIMA EM LABORATÓRIO PARA OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO CERÂMICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E CRISTALINA DOS RESÍDUOS CERÂMICOS</b> .....	<b>17</b>
<b>2.6 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND, DO AGREGADO, DA ÁGUA E DO RESÍDUO</b> .....	<b>18</b>
2.6.1 Cimento.....	18
2.6.2 Cal.....	19
2.6.3 Água.....	20
2.6.4 Agregado miúdo.....	20
2.6.5 Resíduo cerâmico.....	22
<b>2.7 Desenvolvimento das formulações</b> .....	<b>22</b>
<b>2.8 Moldagem dos corpos de prova (cps)</b> .....	<b>22</b>
<b>2.9 Avaliação das propriedades no estado fresco</b> .....	<b>22</b>
<b>2.10 Avaliação das propriedades no estado endurecido</b> .....	<b>23</b>
<b>2.11 Constatação da aplicabilidade no cotidiano das obras</b> .....	<b>23</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1 Obtenção do resíduo cerâmico via indústria</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2 Curva de queima da indústria</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3 Verificação de pozolanicidade de amostras queimadas em indústria via Método de Chapelle</b> .....	<b>26</b>
<b>3.4 Verificação de pozolanicidade de amostras queimadas em laboratório via Método de Chapelle</b> .....	<b>27</b>
<b>3.5 Verificação de pozolanicidade de amostras requeimadas em laboratório via Método de Chapelle</b> .....	<b>28</b>
<b>3.6 Caracterização microestrutural do resíduo</b> .....	<b>30</b>
<b>3.7 Cálculo do traço em massa</b> .....	<b>33</b>
<b>3.8 Determinação das quantidades de materiais segundo as substituições</b> .....	<b>34</b>
<b>3.9 Moldagem dos corpos de prova (cps)</b> .....	<b>35</b>
<b>3.10 Ensaio no estado fresco</b> .....	<b>36</b>
3.10.1 Consistência normal.....	36
3.10.2 Densidade de massa .....	37
3.10.3 Retenção de água.....	38
<b>3.11 Ensaio no estado endurecido</b> .....	<b>40</b>
3.11.1 Resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias.....	40
<b>3.12 Aplicabilidade no cotidiano das obras</b> .....	<b>42</b>
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	<b>4949</b>
<b>5 SUGESTÕES DE ENSAIOS FUTUROS</b> .....	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na cadeia produtiva da construção civil, o segmento da fabricação de telhas e tijolos de cerâmica vermelha gera resíduos após a queima, que usualmente não tem destinação adequada, perdendo a indústria, a administração pública e a sociedade. Diagnóstico conhecido destes resíduos mostra que a quantidade gerada é significativa e existe potencial para sua reciclagem na construção civil, devendo tal possibilidade ser investigada (FONSECA, 2006). A falta de modernização da indústria de cerâmica vermelha faz com que em seu processo haja uma grande perda com geração de resíduos provenientes de tijolos e telhas quebrados ou defeituosos, que passaram pelo ciclo total de produção e foram descartados por apresentar trincas, empenamentos, baixa resistência mecânica, deformações, ou qualquer outro defeito que impeça o uso dentro dos padrões exigidos pela normalização vigente.

Segundo dados coletados, uma única olaria produz em média 240 mil peças cerâmicas por mês, das quais, são descartados 55 mil kg de rejeitos, que geralmente são utilizados como aterros em terraplanagem. Além disso, associada a esse grande volume, tem-se a dificuldade de descarte dos resíduos e o fato de ainda não ter sido encontrado industrial ou cientificamente uma alternativa de utilização total desse montante.

Assim, a reciclagem e a reutilização de resíduos industriais têm sido objetos de pesquisas em diversas instituições, que buscam soluções que conciliem vários aspectos, como custo de deposição, tratamentos, tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de utilização e, finalmente, o impacto econômico e ambiental da reciclagem.

Por outro lado, a construção civil consome agregados, que são materiais naturais não renováveis e estão se tornando escassos em algumas regiões do país. No Brasil, segundo John (2000) *apud* Fonseca (2006), pode-se estimar um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas. A reciclagem dos resíduos na construção civil surge como uma necessidade para a preservação do meio ambiente e é uma das possíveis alternativas para suprir a demanda de agregados para emprego na construção civil (FONSECA, 2006).

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. Na hidratação da pasta de cimento, são gerados cristais, com propriedades aglomerantes, e hidróxido de cálcio (cal hidratada), que pode comprometer a estabilidade química do cimento. Este

composto é solúvel, sendo motivo de desagregação da argamassa ou do concreto. O material pozolânico, em suma, irá consumir a cal hidratada e gerar novos produtos com propriedades aglomerantes. Desta forma, ao eliminar a cal hidratada do material cimentício, a pozolana é de alto interesse, no que tange as suas propriedades de resistência.

O limiar que rege o comportamento pozolânico ou inerte do resíduo da cerâmica vermelha é função da temperatura de sinterização das peças cerâmicas. A literatura vigente aborda diferentes temperaturas de queima com relação ao desenvolvimento de atividade pozolânica, bem como cita quanto influente é a composição química e mineralógica da massa cerâmica verde (VIEIRA, 2005). Peças queimadas acima de 650°C apresentam, enquadrando-se nos diagramas de fases, a formação de fases amorfas, capazes de desenvolver tal propriedade. No entanto, se a temperatura não atingir este patamar, ainda há a viável opção de aproveitar o material inerte como agregado artificial. Em conversas informais com alguns proprietários de cerâmica vermelha em Caruaru, obteve-se como informação que a temperatura média de queima nos fornos atinge 750°C a 950°C, gerando expectativas em relação ao desenvolvimento de atividade pozolânica por esse resíduo regional. Ademais, há a possibilidade de requeima desse resíduo industrial caso não tenha desenvolvido atividade pozolânica na temperatura usualmente empregada nas indústrias.

Após a britagem e cominuição dos rejeitos, tem-se por meio de atividades de peneiramento, a opção da obtenção de uma granulometria fina, próxima a do cimento. Essa escolha tem influência direta no comportamento mecânico, microestrutural e de durabilidade das argamassas de revestimento. Um ponto positivo quando se utiliza esta configuração de granulometria em um compósito é que, em matérias cimentícios, a propriedade denominada compacidade é essencial para a redução de porosidade, permeabilidade e facilidade da incorporação de grãos inertes pelos produtos de hidratação do cimento Portland. A compacidade é alcançada porque grãos menores se localizam no espaço deixado entre os contatos dos grãos maiores, reduzindo o índice de vazios.

Em ambas as opções de incorporação do resíduo na argamassa (em substituição ao cimento ou ao agregado), haverá a redução do volume de resíduo disposto no meio ambiente, contribuindo, no primeiro caso, para redução do uso de cimento, reduzindo custos e a poluição caracteristicamente conhecida das indústrias cimentícias; já no segundo caso, agregados naturais serão menos extraídos pela mineração, reduzindo também custos e impactos ambientais.

Nesse cenário, a presente pesquisa da Universidade Federal de Pernambuco, Campus do Agreste, volta a atenção ao seu entorno e busca reutilizar o rejeito da cerâmica vermelha de Caruaru-PE. Encontram-se instaladas atualmente na cidade de Caruaru, agreste Pernambucano, seis indústrias de cerâmica vermelha, onde não existem sistemas para recuperação desses resíduos, nem, em sua grande parte, qualquer controle sobre a sua disposição.

O sucesso do trabalho refletirá em benefícios para as indústrias cerâmicas, para a indústria da construção civil, inclusive na parte de propostas para habitações populares, e ambientais. A determinação da temperatura ótima de queima em termos de pozolanicidade poderá ser ajustada junto à realidade industrial, bem como a requeima dos resíduos para posterior reemprego como material pozolânico em substituição ao cimento ou como carga em substituição ao agregado.

## **1.1 Objetivos Geral e Específicos**

### *1.1.1. Objetivo Geral*

O objetivo desse estudo é o desenvolvimento de argamassas de revestimento para uso na construção civil com a utilização de rejeitos das indústrias de cerâmica vermelha da cidade de Caruaru-PE como material pozolânico e/ou inerte.

### *1.1.2. Objetivos Específicos.*

- Caracterizar, em termos de pozolanicidade, os resíduos de cerâmica vermelha de Caruaru-PE;
- Avaliar a temperatura ótima de queima de massa verde cerâmica (antes da sinterização), bem como a de requeima para rejeitos das indústrias de cerâmica vermelha da cidade de Caruaru-PE;
- Avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa de revestimento adicionada com rejeito da indústria cerâmica, comparativamente à argamassa padrão de referência.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Obtenção do resíduo cerâmico via indústria**

O resíduo utilizado foi coletado na forma de telhas e tijolos de cerâmica vermelha, descartados por olaria emblemática da região de Caruaru/PE. Foram coletadas peças queimadas a 850°C e 950°C que compõem as duas frentes de produção da empresa, sendo peças menos nobres e mais nobres, respectivamente. As amostras foram moídas em moinho de bolas/barras e classificadas na peneira de malha 200.

### **2.2 Queima em laboratório para obtenção dos resíduos cerâmicos**

As massas cerâmicas verdes também foram coletadas na mesma olaria e então queimadas em mufla controlada a uma taxa de 50°C/h até os patamares de calcinação a serem estudados (850°C, 950°C e 1050°C). Ao atingirem os mesmos, as respectivas amostras permaneceram calcinando por 2 horas e, logo após, resfriando naturalmente até temperatura ambiente, simulando curva de queima adotada na indústria em questão. Todas as amostras foram classificadas na peneira de malha 200.

### **2.3 Requeima em laboratório para obtenção dos resíduos cerâmicos**

As peças que foram originalmente calcinadas a patamares de queima de 850°C e 950°C foram requeimadas em laboratório com o uso de muflas em novas temperaturas de calcinação distintas (950°C e 1050°C, respectivamente), a fim de se obter novas fases vítreas e testar a pozolanicidade de cerâmicas requeimadas. Todas as amostras foram classificadas na peneira de malha 200.

## 2.4 Avaliação do índice de atividade pozolânica do resíduo cerâmico

Foi avaliada a indicação ou não dos resíduos como material pozolânico através do método químico de Chapelle Modificado pelo IPT, que serve para medir a atividade pozolânica em termos químicos, sem a influência de outros fatores como o efeito filler ou o efeito nucleação que aparecem em outros ensaios, como é o caso do ensaio de índice de atividade pozolânica da NBR 5752/2012. O Método Chapelle modificado normalizado pela NBR 15895/2010 é um método quantitativo, indicativo da possibilidade de atividade pozolânica. O ensaio é realizado em uma suspensão de 2 g de CaO puro proveniente da calcinação do CaCO<sub>3</sub>, juntamente com 1 g de pozolana em 250 ml de água, isenta de dióxido de carbono. A mistura é submetida à agitação mecânica sob a temperatura de 90 °C durante 16 horas. Após o resfriamento da solução à temperatura ambiente, faz-se a titulação de 50 ml da mesma com HCl 0,1 N e fenofaleína (1g/L) e estima-se a quantidade de CaO que foi combinada com a pozolana pela Equação 1 abaixo (o resultado é expresso em quantidade de óxido de cálcio fixado por grama de pozolana).

$$\frac{\text{mgCaO}}{\text{g de material}} = \frac{28 \times (V_3 - V_2)}{m_2} \times F_c \times 1,32 \quad (1)$$

Em que,

$m_2$  – massa de material pozolânico;

$V_1$  – volume de HCl 0,1 N consumido no ensaio com uma amostra em ml;

$V_2$  – volume de HCl 0,1 N consumido no ensaio branco; e,

$F_c$  – fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 N.

## 2.5 Caracterização química e cristalina dos resíduos cerâmicos

Os materiais sinterizados, seja após queima ou requeima, em diferentes condições de temperatura, tiveram as fases formadas caracterizadas por Difração de Raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e refinamento de Rietveld. As amostras para análise de Raios-X pelo método do pó foram realizadas em um difratômetro XDR-600 da Shimadzu, com tubo de cobre ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ). A varredura foi realizada com valores de  $2\theta$  entre 5° e 75°. As análises de microscopia eletrônica de varredura, foram realizadas através do

equipamento ESEM-XL30 PHILIPS. A análise quantitativa de Rietveld é baseada na comparação do padrão de difração de raios X observado, com um padrão calculado dos dados de estruturas (parâmetros cristalográficos) das fases existentes. Após a preparação das amostras, todas as medidas e todos os cálculos podem ser feitos automaticamente.

## **2.6 Caracterização do cimento Portland, do agregado, da água e do resíduo**

Foram utilizados materiais usualmente empregados nas construções da região agreste pernambucana a fim de facilitar a aplicação dos resultados obtidos no mercado de construção civil da região.

### **2.6.1 Cimento**

O cimento utilizado foi o CP II Z - 32 da empresa Nassau, por ser um cimento usualmente utilizado na região de Caruaru - Pernambuco.

Apesar de ser um cimento pozolânico, não afetou as análises realizadas, já que o intuito das mesmas foi avaliar a imobilização, como carga, dos resíduos de cerâmica vermelha nas argamassas de revestimento, para tanto, todas as avaliações no estado sólido ocorreram até a idade de 28 dias. As características químicas e físicas fornecidas em boletim técnico da empresa Nassau para o lote utilizado se encontram apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1 - Características químicas do cimento.

Caracterização Química	Resultado (%)
Perda ao fogo	5,33
Resíduo Insolúvel	11,06
SiO <sub>2</sub>	22,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,37
CaO	54,09
MgO	4,51
SO <sub>3</sub>	3,65
Na <sub>2</sub> O	0,14
K <sub>2</sub> O	1,58

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Nassau.

Tabela 2 - Características físicas do cimento.

Caracterização Física	Unidade	Resultado
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,01
Área específica	m <sup>2</sup> /kg	418,00
Consistência normal	%	28,3
Início de pega	horas	4,15
Fim de pega	horas	5,20
Resistência compressão 1 dia	MPa	12,60
Resistência compressão 3 dias	MPa	23,10
Resistência compressão 7 dias	MPa	28,10
Resistência compressão 28 dias	MPa	38,10

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Nassau.

### 2.6.2 Cal

Na composição das argamassas foi utilizada a cal hidratada CH-II, da marca MegaO, fabricante Sibelco. A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam a análise química e física, respectivamente, fornecidas em boletim técnico pela empresa Sibelco.

Tabela 3 - Análise química da cal hidratada.

Caracterização Química	Resultado (%)
CaO	48,79
MgO	26,14
Resíduo Insolúvel	2,96
Umidade	1,06
Perda ao Fogo (1.000°C)	21,05
H <sub>2</sub> O combinada	19,12
CO <sub>2</sub>	3,98
SO <sub>3</sub>	0,08
Óxidos não hidratados	14,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Nassau.

Tabela 4 - Análise física da cal hidratada.

Peneira	Resultado (%)
Malha 30 (0,60 mm)	0,01
Malha 200 (0,075 mm)	11,75

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Cimentos Nassau.

A massa específica da cal foi avaliada utilizando a metodologia da NBR NM 23 sendo encontrado o valor de 2,47 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.6.3 Água

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento local como água de amassamento, que se pressupõe ser livre de impurezas.

### 2.6.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na produção das argamassas recicladas foi proveniente de depósitos do rio Ipojuca na região de Caruaru-PE. Para a utilização, na presente pesquisa, todo o agregado miúdo foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas e peneirado em peneira de malha 4,75 mm e 0,75 µm para sua padronização, seguindo a definição para agregado da

NBR NM 52/2009. A sua caracterização granulométrica e física foi realizada após esse pré-tratamento, caracterizando-o tal qual empregado nas argamassas.

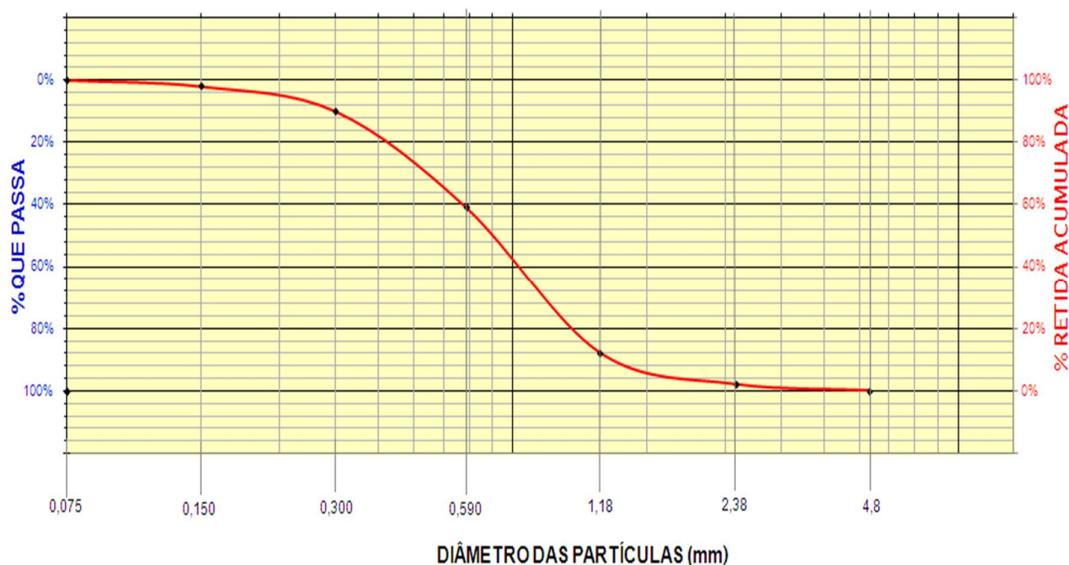
A Tabela 5 e a Figura 1 apresentam sua distribuição e curva granulométrica, respectivamente.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia.

Peneira ( mm)	4,75	2,38	1,18	0,590	0,300	0,150	0,075
% Retida acumulada	0	2	10	41	88	98	100

Fonte: Tabela da autora.

Figura 1 - Curva granulométrica da areia utilizada nas argamassas.



Fonte: Figura da autora.

As características físicas foram realizadas seguindo os procedimentos da NBR NM 248/2003 e NBR 9776/1986 e encontram-se compiladas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características físicas da areia.

Característica	Unidades	Resultado
Módulo de finura	-	2,39
Dimensão máxima característica	mm	2,38
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	2,60

Fonte: Tabela da autora.

### 2.6.5 Resíduo cerâmico

A massa específica real do resíduo foi de 2,57 g/cm<sup>3</sup>, determinada segundo a NBR NM 23/2001. Uma caracterização do resíduo mais detalhada, microestrutural, será mostrada adiante.

## 2.7 **Desenvolvimento das formulações**

Foi produzida uma argamassa de referência com composição volumétrica 1:2:9 (cimento:cal:agregado), comumente utilizada como reboco, cujas características, em várias idades (7, 28 e 90 dias), foram comparadas com as argamassas adicionadas com o rejeito cerâmico. O traço em volume foi transformado em massa a fim de se facilitar os trabalhos laboratoriais. E então foram determinadas as quantidades de cada material em todas as formulações, cujos teores de substituição ao agregado miúdo foram respectivamente de 0%, 10%, 15%, 20% e 30%. Optou-se por deixar o parâmetro fator água-cimento da argamassa constante frente às substituições. Para isso, foi usada água em quantidade suficiente para atingir a consistência normal da argamassa padrão (0% de substituição) de  $270 \pm 10$ mm (SILVA et al, 2006).

## 2.8 **Moldagem dos corpos de prova (cps)**

As argamassas foram misturadas em argamassadeira, moldadas em moldes metálicos cilíndricos de 5x10cm e curadas ao ar de acordo com as especificações da NBR 13279/1995. Para cada teor de substituição foram moldados 12 corpos de prova, pois foram feitos ensaios de resistência a 7, 28 e 90 dias (são 3 amostras por idade), contabilizando-se então 60 corpos de prova.

## 2.9 **Avaliação das propriedades no estado fresco**

No estado fresco foram realizados os ensaios de consistência normal (NBR 13276/2002), retenção de água (NBR 13277/2005), densidade de massa (NBR 13278/1995).

## **2.10 Avaliação das propriedades no estado endurecido**

Os ensaios mecânicos foram realizados às idades de 7, 28 e 90 dias em prensa universal, com 3 corpos-de-prova por ensaio. Foram realizados ensaios de resistência à compressão (NBR 13279/1995).

## **2.11 Constatação da aplicabilidade no cotidiano das obras**

As argamassas desenvolvidas foram levadas a um canteiro de obras da cidade. Foi solicitada a fixação das mesmas, por um mestre de obras, em alvenaria previamente chapiscada, a fim de se reproduzir fielmente a sua aplicabilidade ao cotidiano da construção civil. O mestre foi indagado sobre a trabalhabilidade das massas, bem como se observou o surgimento ou não de trincas por retração após alguns dias da aplicação.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Obtenção do resíduo cerâmico via indústria

As Figura 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5, são referentes a fotos coletadas durante a visita à cerâmica emblemática parceira do presente estudo, em Caruaru.

Figura 2 - Depósito de argila.



Fonte: Foto da autora.

Figura 3 – Caixaão alimentador.



Fonte: Foto da autora.

Figura 4 – Forno tipo abóbada.



Fonte: Foto da autora.

Figura 5 – Controle de qualidade.



Fonte: Foto da autora.

A cerâmica foi escolhida como parceira por sua excelência em qualidade e controle de escolha das matérias-primas, bem como o acompanhamento de curvas de queima bem definidas com repetitividade e reprodutibilidade, importantes para os objetivos da presente pesquisa a serem alcançados e posteriormente aplicados na rotina de uma indústria cerâmica.

Nessa cerâmica, então, foram coletadas amostras de telha e tijolos queimadas a diferentes temperaturas (950°C e 850°C), temperaturas queimadas na indústria como protocolo e que diferencia uma cerâmica de melhor qualidade e mais cara (950°C) e outra de qualidade mais inferior (850°C), mas mantendo com excelência todas as propriedades para ser aplicada na prática. Segundo dados da própria empresa fornecidos em conversas informais, são cerca de 60.000 peças perdidas por mês, englobando ambas as temperaturas.

Na Figura 6 encontram-se expostos os aspectos das amostras moídas e peneiradas, onde se ressalta a diferença de coloração das mesas, queimadas a (850°C - esquerda e 950°C - direita). A amostra à direita (calcinação a uma temperatura de aproximadamente 950°C) tem uma coloração alaranjada mais intensa que a outra amostra (calcinação a uma temperatura aproximadamente de 850°C). Essa diferença de coloração está intimamente relacionada com as diferentes fases cristalinas e/ou amorfas cerâmicas formadas em consequência da sinterização, porque a 950°C os produtos apresentam maior fundência que a temperaturas menores, de forma que produtos cristalinos formados são diferentes em ambas as situações.

Figura 6 - Diferença de coloração de amostras moídas da indústria queimadas a (850°C - esquerda e 950°C - direita).



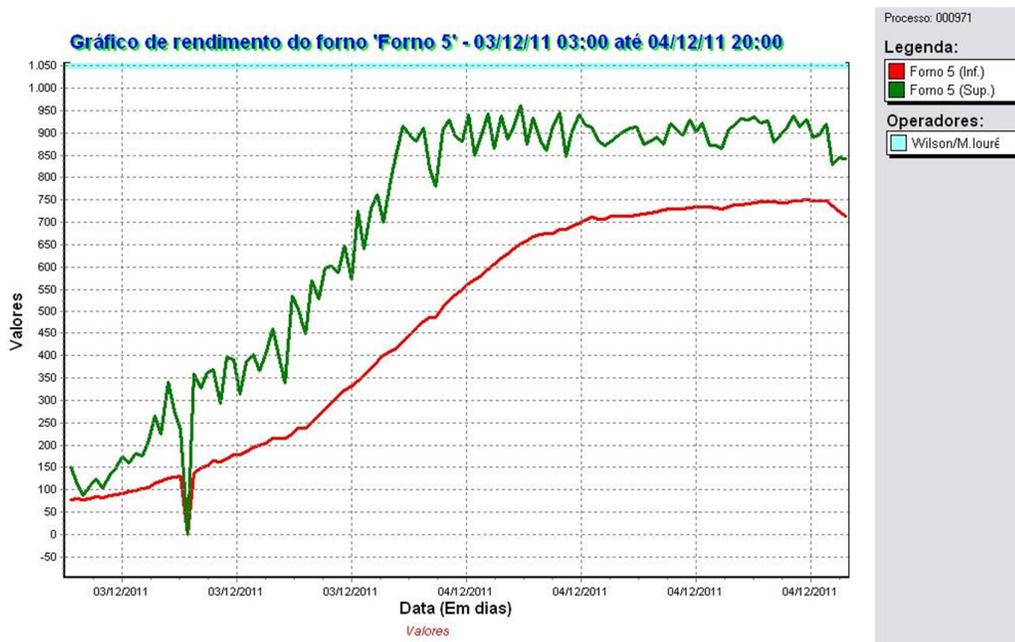
Fonte: Foto da autora.

### 3.2 Curva de queima da indústria

Na indústria escolhida para a coleta das amostras, estas são queimadas obedecendo a uma curva de queima. As curvas de queima de amostras com patamares de calcinação de, respectivamente, 850°C (curva inferior, verde) e 950°C (curva superior, vermelha) encontram-se expostas na Figura 7. A importância da coleta da curva de queima utilizada na

indústria é porque serviu de base para se montar as fases de queima controlada em mufla no laboratório. Assim, para simular essas curvas em mufla do laboratório, queimou-se as amostras a uma taxa de 50°C/h até o patamar de calcinação. Ao atingir o mesmo, deixou-se as amostras calcinando por 2 horas e, logo após, resfriando até temperatura ambiente.

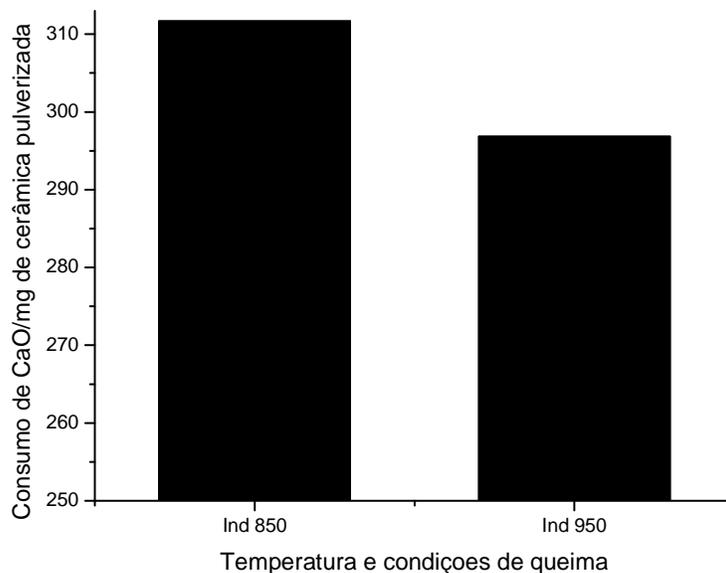
Figura 7 - Curva de queima obtida nos fornos da indústria emblemática.



### 3.3 Verificação de pozolanicidade de amostras queimadas em indústria via Método de Chapelle

O consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C e 950°C coletadas na indústria encontram-se expostas na Figura 8.

Figura 8 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C e 950°C coletadas na indústria.



Nota-se que os resultados variam de acordo com as diferentes temperaturas de calcinação, confirmando a hipótese inicial, de que há influência da temperatura de queima na pozolanicidade das cerâmicas vermelhas.

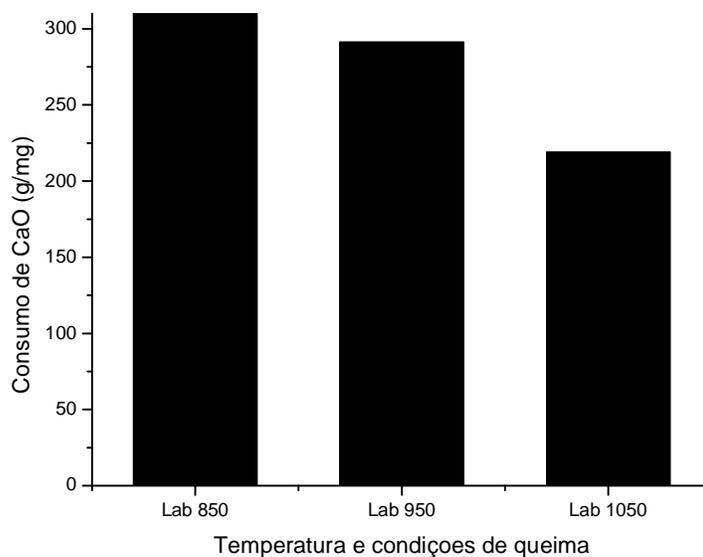
Verifica-se que a tendência a maior capacidade de fixar o cálcio está na amostra sinterizada a 850°C, comparativamente a amostra sinterizada a 950°C. Esse fenômeno pode ser um indicativo de que as argilas são de base caulínica, onde compostos reativos são formados a temperaturas mais baixas.

Analisando de forma global, destaca-se que ambas as amostras, tanto a sinterizada a 850°C, quanto a 950°C, foram capazes de fixar cálcio, que é um indicativo de que há produtos amorfos reativos na sua composição, principalmente pelo fato da amostra ter sido peneirada na malha 200, o que favorece a aparição da atividade pozolânica. Entretanto o consumo mínimo de CaO, indicado por Christófolli (2010), de 330 mg CaO/mg de amostra para essa amostra ser considerada pozolânica, não foi atingido.

### **3.4 Verificação de pozolanicidade de amostras queimadas em laboratório via Método de Chapelle**

O consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C e 950°C em laboratório a partir da massa verde encontram-se expostas na Figura 9.

Figura 9 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C , 950°C e 1050°C em laboratório.



Verifica-se que para as condições de queima em mufla no laboratório também foi verificada redução na capacidade de fixar CaO pelo material pulverizado quando do aumento da temperatura, indicando a queima a 850°C como mais efetiva.

### **3.5 Verificação de pozolanicidade de amostras requeimadas em laboratório via Método de Chapelle**

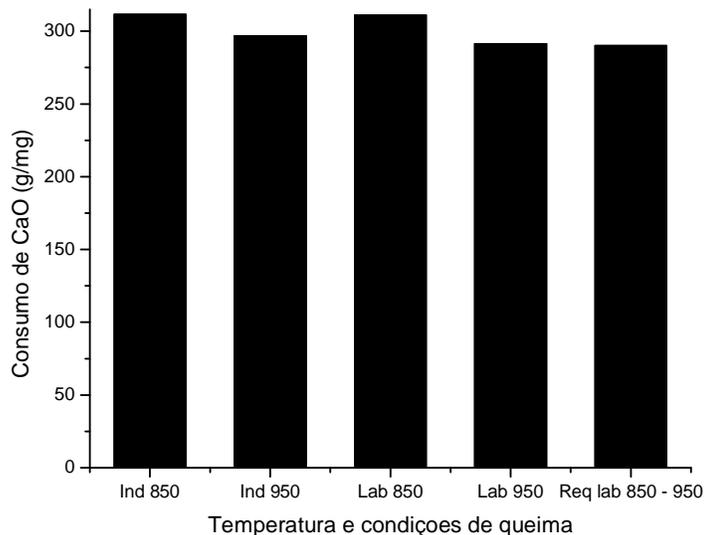
O consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C e 950°C coletadas na indústria, comparativamente as amostras queimadas nas mesmas temperaturas em laboratório e a requeimada de 850°C para 950°C encontram-se expostas na Figura 10.

Verifica-se que a simulação da curva de aquecimento em mufla laboratorial reproduziu as condições de queima na indústria, haja vista que os valores de consumo de CaO se

mantiveram no mesmo patamar que os encontrados diretamente das amostras sinterizadas na indústria.

Ao se analisar do ponto de vista da operação de requeima de 850°C para 950°C, não houve influência significativa na capacidade do material em fixar CaO, possivelmente porque todas fases necessárias já se encontravam cristalizadas, não sendo a temperatura suficiente para torna-las vítreas. As amostras sinterizadas industrialmente e laboratorialmente a 850°C apresentaram o maior consumo de CaO/mg de amostra.

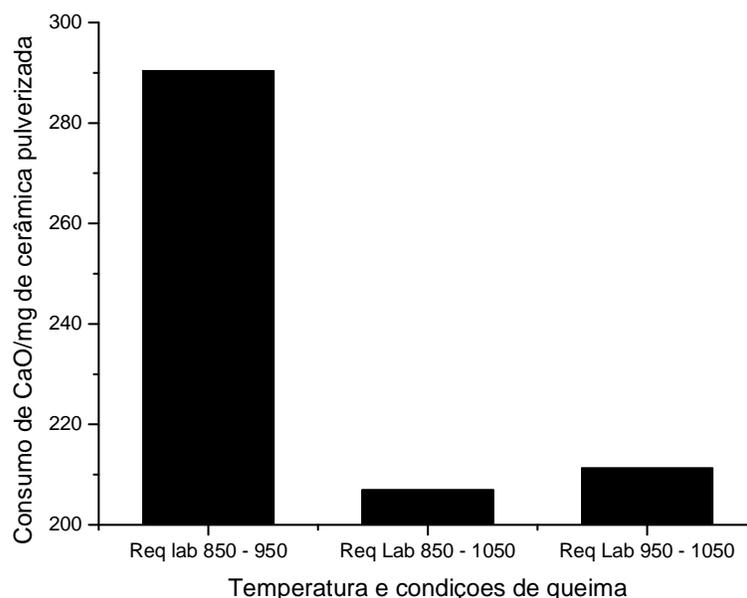
Figura 10 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras queimadas a 850°C e 950°C coletadas na indústria, comparativamente as amostras queimadas nas mesmas temperaturas em laboratório e a requeimada de 850°C para 950°C.



O consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para as amostras requeimadas no laboratório de 850°C para 950°C, de 850°C para 1050°C e de 950°C para 1050°C encontram-se expostas na Figura 11. Verifica-se que, de fato, a temperatura de queima de 1050°C não é interessante, quando comparada a temperaturas mais baixas para a cerâmica ora em estudo do ponto de vista da atividade pozolânica. Isso se deve à formação de novas fases cristalinas quando do aumento da temperatura ou da transformação de fases em novas fases. Assim, temperaturas de sinterização mais baixas, estudadas em torno de 850°C, tenderam a gerar material mais reativo nesse estudo, seja na queima, seja na requeima. Entretanto ainda sem atingir o consumo mínimo supracitado de 330 mg CaO/mg de amostra.

De fato, Rodom (2007) alerta que, em geral, as argilas necessitam de temperaturas na faixa de 600°C a 900°C para desenvolver atividade pozolânica; temperaturas superiores poderão levar a perda da capacidade de fixação do hidróxido de cálcio (BARONIO e BINDA, 1997 apud RONDON, 2007).

Figura 11 – Consumo de CaO (mg CaO/mg de amostra) para amostras requemadas no laboratório de 850°C para 950°C, de 850°C para 1050°C e de 950°C para 1050°C.



### 3.6 Caracterização microestrutural do resíduo

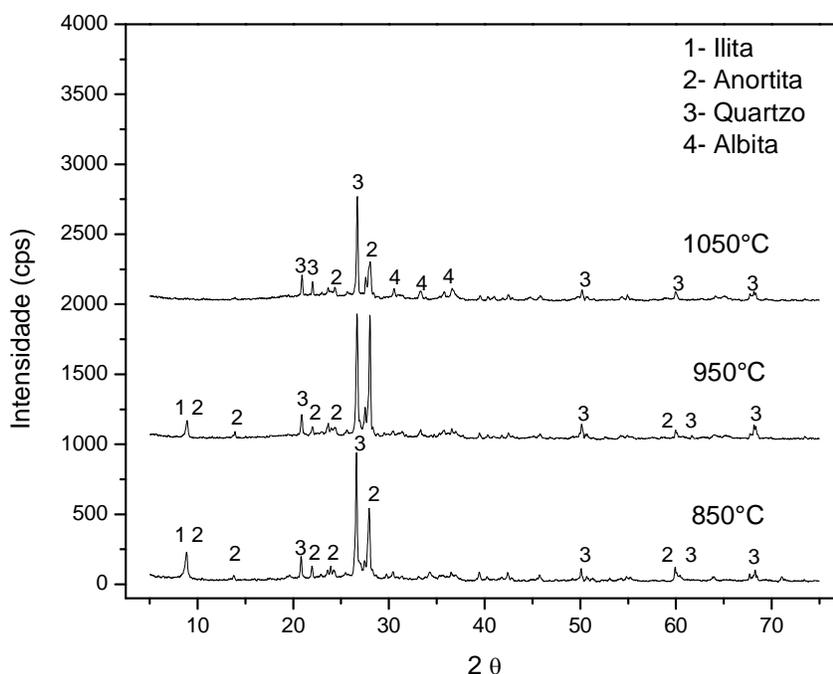
Com o objetivo de obter informações sobre as transformações mineralógicas sofridas, os blocos queimados foram analisados com as técnicas de DRX e MEV. Segue a Figura 12 com os resultados de DRX das amostras calcinadas a 850, 950 e 1050°C.

Devido ao elevado teor de quartzo das amostras e sua facilidade de orientar-se (orientação preferencial), resultaram picos de grandes intensidades, que dificultam a identificação de outras fases. A sílica na forma de quartzo é o principal mineral nas argilas, que pode ser de sua composição ou ter sido advinda de contaminação da amostra de argila por areia.

O fato de não ter se verificado a presença de mulita nem espinélio nem cristobalita (RONDON, 2007), nem metacaulinita após a sinterização a 850°C, 950°C e 1050°C sugere que a argila que deu origem ao material não seja de origem caulínica. Por outro lado, o

resquício do argilomineral ilita identificado após sinterização sugere que a argila utilizada como matéria-prima possa ser de origem ílítica. Um ponto importante é que 850°C, temperatura mais baixa estudada no presente trabalho, seja uma alta temperatura para a obtenção da metacaulinita (500°C a 900°C). Vários trabalhos estabeleceram que a temperatura máxima de calcinação da argila caulinítica para obter a característica de pozolanicidade é de 900°C (RONDON, 2007).

Figura 12 - DRX de amostras calcinadas a patamares de 850, 950 e 1050°C.

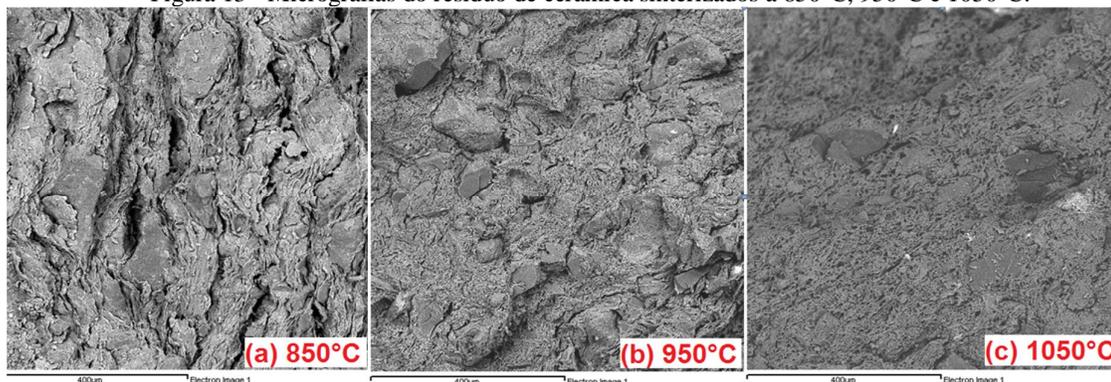


Há picos representativos de minerais cristalinos como quartzo, albita e anortita, que são pouco ou não reativos na reação pozolânica, conforme destacado no trabalho de Montanheiro (2011). Relaciona-se então a esses picos cristalino o fato das amostras não terem atingido o consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de amostra a fim de serem classificadas como pozolânicas.

A ilita ainda aparece nos blocos queimados até 950°C picos em 2θ de 8,8°. A partir desta temperatura há rompimento da estrutura (RONDON, 2007), não sendo, então, mais observado seu pico característico a temperatura de sinterização de 1050°C.

Nota-se um discreto halo no intervalo  $2\theta$  de 15 a 40° que, segundo Rondon (2007), pode estar relacionado com a formação da metacaulinita para 850°C e 950°C. O mesmo halo observado para a temperatura de sinterização de 1050°C, no entanto, não está relacionado à formação da caulinita, porque nestas temperaturas não há metacaulinita. Esse último halo está relacionado à presença de outros materiais não cristalinos, provavelmente fases vítreas, típicas das sinterizações em temperaturas mais elevadas, como comprovado por microscopia eletrônica de varredura das amostras sinterizadas a 1050°C (Figura 13c).

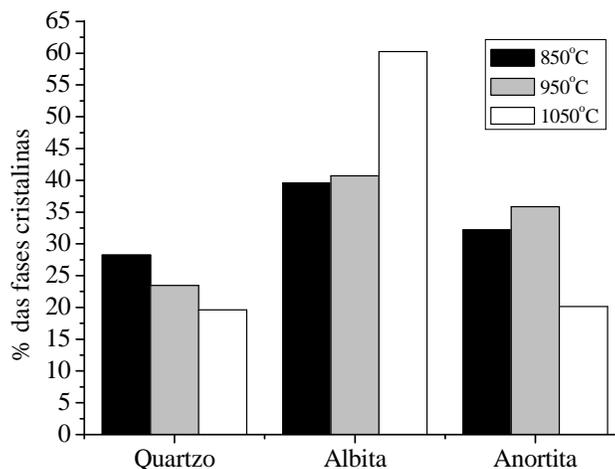
Figura 13 - Micrografias do resíduo de cerâmica sinterizados a 850°C, 950°C e 1050°C.



Observa-se que, comparativamente às amostras sinterizadas a 850°C e 950 °C (Figura 13a e Figura 13b, respectivamente) a formação de fase vítrea é evidente a 1050 °C, resultando em uma morfologia mais densa e menos porosa e sem as lamelas típicas dos argilominerais e estrias consequentes da extrusão (Figura 13a). A 850°C e 950°C pode ser vista ainda a morfologia típica dos argilominerais em placas, mostrando que a sinterização ocorreu somente por fase sólida, enquanto que na última foi por fase líquida (RONDON, 2007).

Essa fase líquida abundante na temperatura de 1050°C a está diretamente relacionada com o aumento da fase albita, como pode ser visto na Figura 14, gráfico que compila a quantificação das fases presentes nos difratogramas expostos na Figura 12 para as amostras calcinadas a 850, 950 e 1050°C. Embora esse teor de albita não sofra uma variação significativa em função da temperatura de aquecimento de 850 para 950°C, para 1050 °C, o aumento do teor de albita é acompanhado por uma redução no teor da fase anortita. A redução significativa do teor de quartzo juntamente com a redução do teor de anortita em temperaturas mais altas sugere a reação entre estas duas fases favorecendo a formação de albita.

Figura 14 – Quantificação de fases por Rietveld para amostras calcinadas a patamares de 850, 950 e 1050 °C.



### 3.7 Cálculo do traço em massa

As argamassas de revestimento são geralmente feitas em obras com o traço em volume 1:2:9. Para facilitar o trabalho laboratorial, este traço foi convertido em massa. Seguem os resultados:

$$M_{\text{cimento}} = 264,8\text{g}, M_{\text{cal}} = 355,5\text{g}, M_{\text{areia}} = 2752,5\text{g}.$$

Esses parâmetros estão referenciados na Lista de Abreviaturas e Símbolos.

Traço em proporção de massa (cimento:cal:areia:x), sendo x = fator água-cimento:

$$\frac{264,8\text{g}}{264,8\text{g}} : \frac{355,5\text{g}}{264,8\text{g}} : \frac{2752,5\text{g}}{264,8\text{g}} = 1 : 1,34 : 10,39 : x$$

Optou-se por deixar o parâmetro fator água-cimento da argamassa constante frente às substituições. Para isso, foi usada água em quantidade suficiente para atingir a consistência normal da argamassa padrão (0% de substituição) de  $270 \pm 10\text{mm}$  (SILVA et al, 2006).

Seguem as tentativas de traço da argamassa padrão para obter a consistência normal de  $270 \pm 10\text{mm}$ , de acordo com a NBR 13276/2002:

1ª tentativa – 1 : 1,34 : 10,39 : 3,8 – Consistência normal obtida de 360mm (fora do intervalo).

2ª tentativa – 1 : 1,34 : 10,39 : 3,42 – Consistência normal obtida de 355mm (fora do intervalo).

3ª tentativa – 1 : 1,34 : 10,39 : 3,14 – Consistência normal obtida de 273,17mm (DENTRO do intervalo).

Logo, tem-se o traço padrão em massa:

$$1 : 1,34 : 10,39 : 3,14$$

### 3.8 Determinação das quantidades de materiais segundo as substituições

Visto que os resíduos cerâmicos não apresentaram atividade pozolânica suficiente para uma substituição ao cimento, optou-se por misturar os tipos das peças descartadas, calcinadas a diferentes temperaturas, provenientes da indústria para única moagem e peneiramento nas especificações descritas anteriormente, simulando assim uma estação de triagem. Assim, constituiu-se um resíduo único que foi utilizado nas formulações, formado pelas cerâmicas de diferentes temperaturas de calcinação.

Conforme estudo do traço descrito em 3.7, a Tabela 7 sintetiza o quantitativo de materiais segundo as substituições.

Tabela 7 - Quantitativo de materiais utilizados nas formulações.

<i>Substituição (%)</i>	<i>Cimento (g)</i>	<i>Cal (g)</i>	<i>Areia (g)</i>	<i>Resíduo (g)</i>	<i>Água (g)</i>	<i>Total materiais secos (g)</i>
0	196,4	263,2	2040,6	0	617,6	2500,2
10	196,4	263,2	1836,63	204,07	617,6	2500,3
15	196,4	263,2	1734,51	306,09	617,6	2500,2
20	196,4	263,2	1632,48	408,12	617,6	2500,2
30	196,4	263,2	1428,42	612,18	617,6	2500,2

O total de materiais secos (última coluna) está de acordo com a NBR 13276/2002:

Para a preparação de argamassas frescas a serem utilizadas em ensaios de caracterização do material, recomenda-se usar, para cada mistura com água, 2,5 kg com aproximação de 1,0 g mais próximo de material seco (massa de argamassa industrializada ou soma das massas dos componentes anidros, no caso de argamassa do tipo dosado em obra).

### 3.9 Moldagem dos corpos de prova (cps)

O aspecto final dos corpos de prova durante e após desmoldagem pode ser visto nas Figura 15 e Figura 16 , respectivamente.

Figura 15 - Aspecto final dos cps durante moldagem



Fonte: Foto da autora

Figura 16 - Aspecto final dos cps após desmoldagem, mostrando desde o referência e com adições de 10, 15, 20 e 30% do resíduo cerâmico, respectivamente da esquerda para a direita.



Fonte: Foto da autora

Pode-se notar na Figura 16 que quanto maior o teor de substituição mais alaranjado se torna o corpo de prova.

### **3.10 Ensaios no estado fresco**

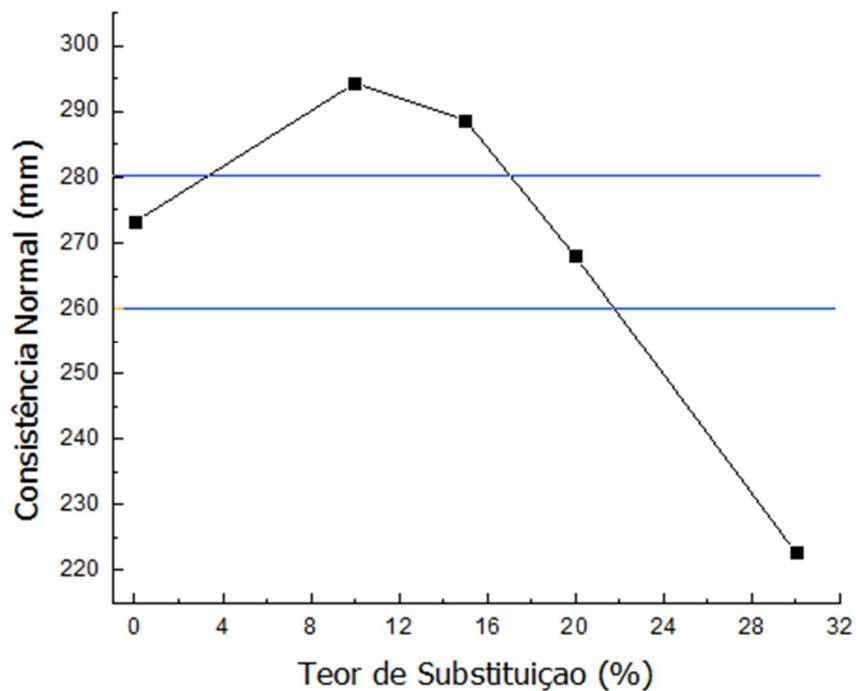
#### *3.10.1 Consistência normal*

Os valores de índice de consistência da argamassa padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30% encontram-se expostos na Figura 17.

Nota-se que há dois fenômenos que concorrem concomitantemente no comportamento da consistência. Para adições menores (10 e 15%) houve uma tendência ao aumento do índice de consistência da argamassa, ou seja, a massa no estado fresco ficou mais fluida. Esse fenômeno é regido pelo aspecto morfológico da superfície do grão de cerâmica vermelha queimada e moída, devido ao aspecto denso e sinterizado da superfície do resíduo visto nas micrografias (Figura 13), absorvendo pouca água e facilitando o deslizamento e rolamento da pasta de cimento em estado fresco com os grãos do agregado e do resíduo.

Por outro lado, ao aumentar para 30% a adição do resíduo, outro fenômeno rege o comportamento, levando à redução da consistência. Esse fenômeno é caracterizado pelo aumento da superfície específica dos componentes da argamassa, devido ao resíduo ser extremamente fino. Deste modo, há uma maior absorção da água e uma diminuição da consistência normal. Além disso, a grande quantidade de resíduo dificulta o fenômeno do rolamento. Ratificando esse raciocínio, Silva et al, (2005) ressaltam que o teor de finos e a forma dos grãos são os fatores predominantemente influentes na consistência das argamassas.

Figura 17 - Consistência normal (mm) das argamassas padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30%.

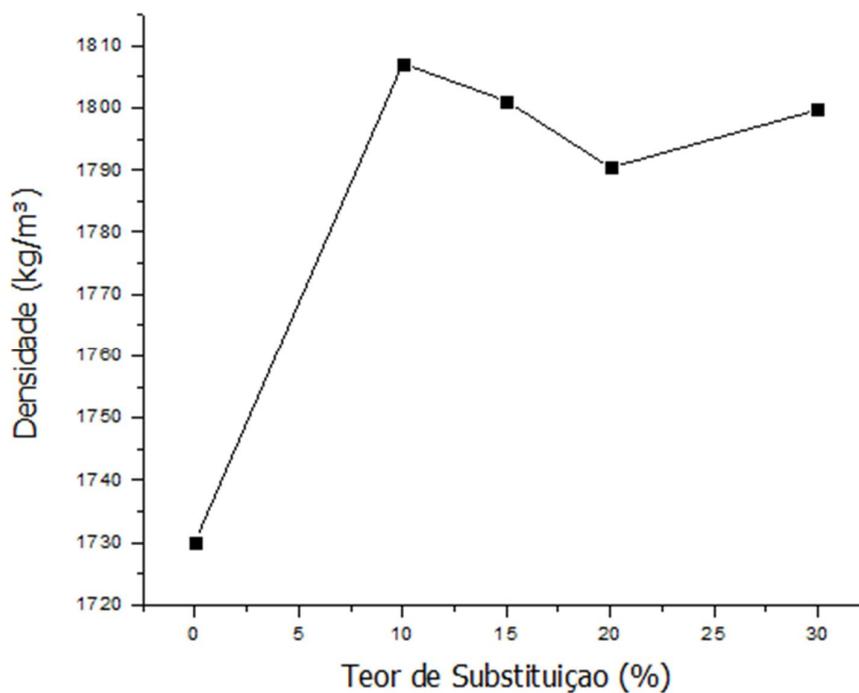


Verifica-se também na Figura 17 que apenas a argamassa reciclada de teor de substituição de 20% possui consistência normal (261mm) dentro do intervalo padrão adotado ( $270 \pm 10$ mm) e verificado na argamassa padrão.

### 3.10.2 Densidade de massa

Os valores de densidade de massa da argamassa padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30% encontram-se expostos na Figura 18.

Figura 18 - Densidade (kg/m<sup>3</sup>) das argamassas padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30%.

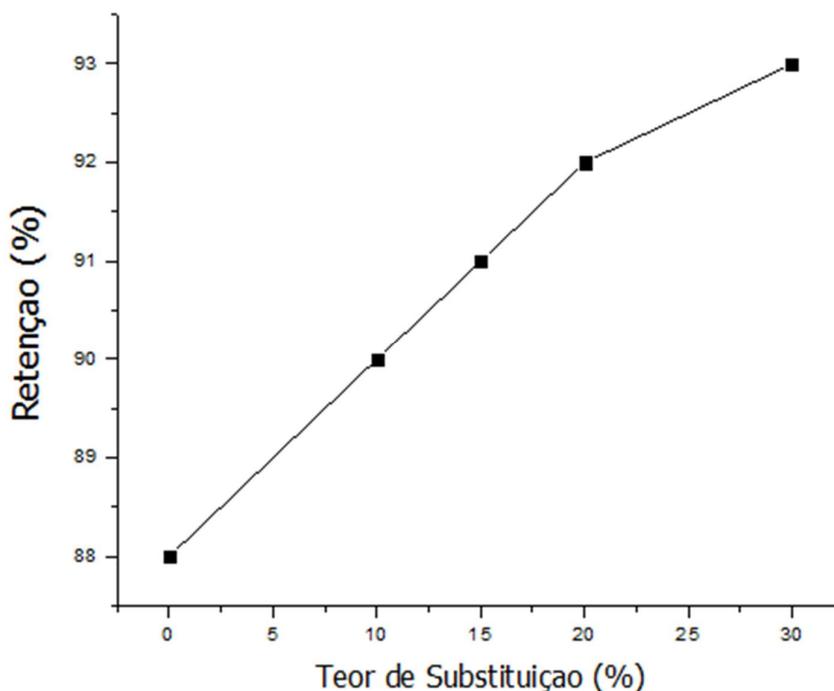


Nota-se que, com a substituição (seja ela em qualquer teor), há um aumento considerável da densidade da argamassa. A densidade de massa no estado fresco aumenta porque como se aumenta a área superficial do resíduo em função de sua alta finura, em substituição a areia, que é inerte, as partículas, quando úmidas apresentam uma massa maior. Além disso, esse fenômeno é consequência principalmente da baixa densidade do resíduo face à areia, fazendo que 10% de resíduo de cerâmica vermelha em substituição à areia apresente um volume muito maior de resíduo.

### 3.10.3 Retenção de água

Os resultados se encontram expostos na Figura 19.

Figura 19 - Retenção de água (%) das argamassas padrão e adicionada de resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 10, 15, 20 e 30%.



Pode-se verificar que o valor da retenção aumenta proporcionalmente aos teores de substituição. Este é um resultado positivo, visto que a retenção de água é uma propriedade que está associada à capacidade da argamassa fresca manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação seja pela absorção de água da base.

De acordo com a NBR 13281/2001, a argamassa de 0% de substituição possui uma retenção de água normal ( $\geq 80$  e  $\leq 90$ ); já as outras argamassas possuem uma retenção de água alta ( $> 90$ ).

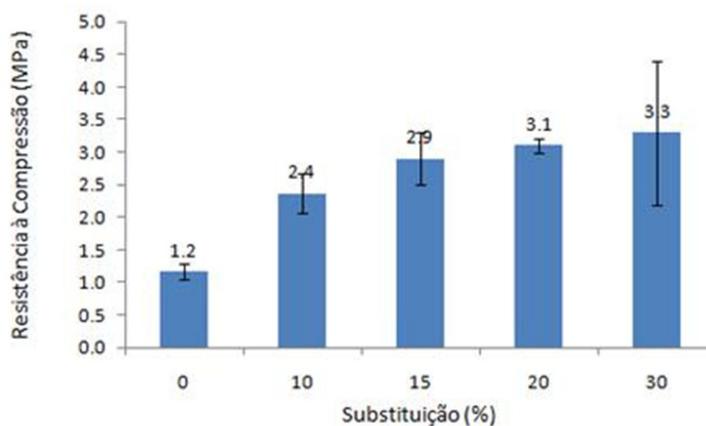
Em trabalho realizado por Bahiense (2008), os autores propuseram a utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água e discutem que a superfície de resposta gerada em seus experimentos apresentou capacidade de retenção de água da argamassa variando de 88% a 94,5%, valores coerentes com os determinados nesse trabalho.

### 3.11 Ensaios no estado endurecido

#### 3.11.1 Resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias

Seguem os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias de idade nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22, respectivamente.

Figura 20 - Resistência à compressão aos 7 dias.



Nota-se que a resistência à compressão aos 7 dias (Figura 20) aumentou proporcionalmente aos teores de substituição, levando em consideração os desvios padrões. Tal fato pode ser explicado pelo efeito filler provocado pela fina granulometria dos resíduos (SILVA et al, 2005; SILVA et al, 2006). Ao analisar os desvios padrões relativos às adições de 10, 15 e 20%, ainda na idade de 7 dias, é visualmente claro que houve um aumento na média de 100%, 142% e 158%, ratificando a real tendência de aumento da resistência mecânica do sistema com a adição do resíduo.

Figura 21 - Resistência à compressão aos 28 dias.

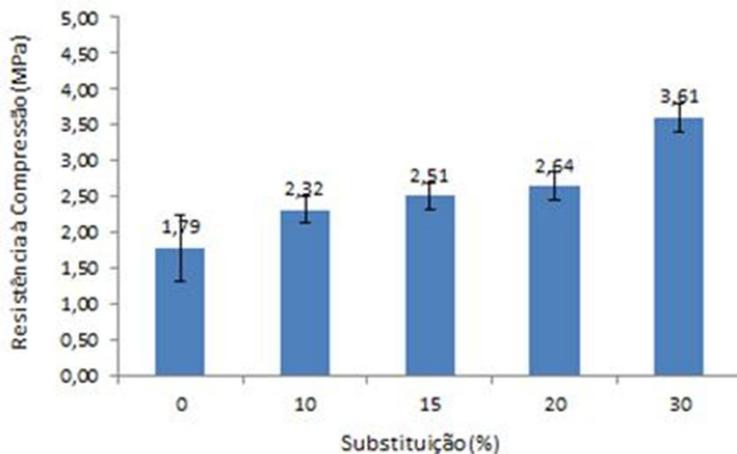
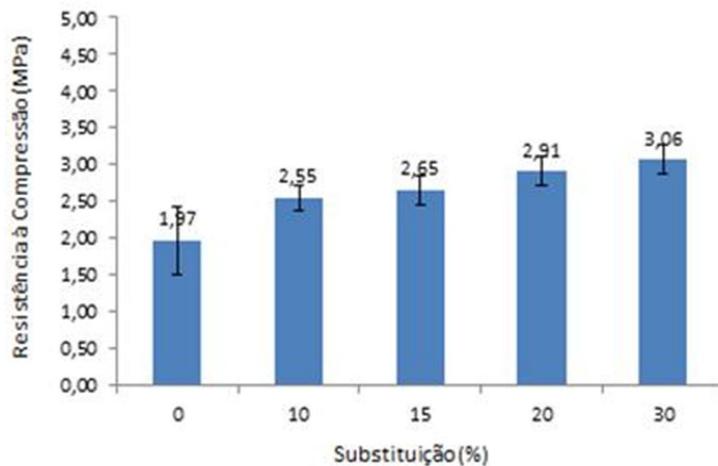


Figura 22 - Resistência à Compressão aos 90 dias.



Nota-se que o mesmo comportamento de aumento de resistência aconteceu nas outras idades, de 28 (Figura 21) e 90 dias (Figura 22). Por outro lado, no caso da adição de 30% destaca-se um desvio padrão alto, provavelmente consequência da grande quantidade de resíduos em função do tamanho do corpo de prova, dificultando a homogeneização na distribuição normal do resíduo na massa em estado fresco e endurecido. O não incremento nesse parâmetro aos 90 dias ratifica a não atividade pozolânica do resíduo.

Destaca-se que a NBR 13281/2002 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Requisitos - cita que a resistência mínima para argamassas de revestimento em área interna deve ser de 0,1 MPa para Classe I – revestimentos internos de parede e teto.

### 3.12 Aplicabilidade no cotidiano das obras

Foi verificada a aplicabilidade no cotidiano das argamassas desenvolvidas com a ajuda do mestre de obras, José Galdino, experiente de uma construtora da cidade. As argamassas foram fixadas em uma alvenaria previamente chapiscada. Os depoimentos do mestre a cerca da aplicação e trabalhabilidade de cada argamassa em função dos respectivos teores de substituição seguem:

- Para a argamassa com teor de substituição de 10%: “Massa boa para trabalhar, mas é maneira para sarrafear, porque não tem liga. Tem que dar o acabamento muito rápido.” (Figura 23)

Figura 23 - Aplicação da argamassa com teor de 10%.



Fonte: Foto da autora

- Para a argamassa com teor de substituição de 15%: “Massa boa para trabalhar, não é maneira para sarrafear, pois tem liga e é boa para acabamento.” (Figura 24)

Figura 24 - Aplicação da argamassa com teor de 15%.



Fonte: Foto da autora

- Para a argamassa com teor de substituição de 20%: “Massa boa para trabalhar, pesada para sarrafejar, pois tem liga. É boa para acabamento. Tem um acabamento fino.” (Figura 25)

Figura 25 - Aplicação da argamassa com teor de 20%.



Fonte: Foto da autora

- Para a argamassa com teor de substituição de 30%: “Massa ruim para trabalhar, é tão ligada que não dá para sarrafejar direito. Não tem como desempolar. É ruim para acabamento.” (Figura 26)

Figura 26 - Aplicação da argamassa com teor de 30%.



Fonte: Foto da autora

Segue na Figura 27 uma visão geral da fixação das argamassas na alvenaria de uma casa previamente chapiscada.

Figura 27 - Visão geral da fixação das argamassas.



Fonte: Foto da autora

O mestre de obras aprovou o uso de todas as argamassas, exceto a de teor de 30%, em relação ao quesito trabalhabilidade. Afirmou que elas poderiam tranquilamente ser utilizadas no canteiro de obras. Nota-se também que os depoimentos supracitados do mestre estão

coerentes com os resultados laboratoriais. Na aplicação das argamassas em ordem crescente dos teores de substituição, o mestre começa a perceber um aumento na “liga” da argamassa. Este aumento de “liga” é explicado pela diminuição da consistência normal, bem como pelo aumento da densidade das argamassas em função do aumento do teor de substituição. Ou seja, com o aumento da quantidade de resíduo, a argamassa foi perdendo consistência e ganhando densidade.

Pode-se verificar também o aspecto final das argamassas (com os seus respectivos valores de substituição) endurecidas na alvenaria após 5 dias da fixação e sujeitas às condições comuns de um ambiente de canteiro de obras (sol, chuva, abrasão, gradientes térmicos, etc). Veja as figuras abaixo.

Figura 28 - Aspecto final da argamassa com teor de 0%.



Fonte: Foto da autora

Figura 29 - Aspecto final da argamassa com teor de 10%.



Fonte: Foto da autora

Figura 30 - Aspecto final da argamassa com teor de 15%.



Fonte: Foto da autora

Figura 31 - Aspecto final da argamassa com teor de 20%.



Fonte: Foto da autora

Figura 32 - Aspecto final da argamassa com teor de 30%.



Fonte: Foto da autora

Nota-se que apenas a argamassa com teor de 30% de substituição apresentou rachaduras, Figura 32. Estas trincas são devidas à retração térmica em uma argamassa de baixa consistência, ou com muita “liga” como expressou o mestre.

## 4 CONCLUSÕES

Em função de cada grupo de resultados e de acordo com os objetivos da pesquisa, formularam-se as seguintes conclusões:

- Caracterizar, em termos de pozolanicidade, os resíduos de cerâmica vermelha de Caruaru-PE:
  - i. As amostras de resíduos de cerâmica vermelha, tanto coletados na indústria, quanto sinterizados em laboratório a partir da massa verde, foram capazes de fixar CaO com índices entre 207 e 311 mg/g, o que indica a presença de material amorfo reativo.
  - ii. Há picos da difração de raios-X representativos de minerais cristalinos como quartzo, albita e anortita, que são pouco ou não reativos na reação pozolânica.
  - iii. O resíduo não se caracteriza como pozolânico.
  
- Avaliar a temperatura ótima de queima de massa verde cerâmica (antes da sinterização), bem como a de requeima para rejeitos das indústrias de cerâmica vermelha da cidade de Caruaru-PE:
  - i. A requeima não teve influência no desenvolvimento de atividade pozolânica, sendo inclusive prejudicial quando se requeimou para a temperatura de 1050 °C.
  - ii. Para a argila da região, temperaturas menores parecem ser mais efetivas para obtenção de amostras mais reativas.
  - iii. As amostras sinterizadas industrialmente e laboratorialmente a 850 °C apresentaram o maior consumo de CaO/mg de amostra, entretanto não atingiram o consumo mínimo recomendado pela literatura de de 330mg/g.
  
- Avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa de revestimento aditivada com rejeito da indústria cerâmica, comparativamente à argamassa padrão de referência:

- i. Nota-se que as substituições, em termos gerais, foram positivas, visto que as propriedades tanto do estado fresco como do estado endurecido não sofreram grandes variações.
- ii. Confrontando os resultados laboratoriais e práticos (na aplicação no cotidiano das obras), para a produção de uma argamassa de revestimento reciclada com rejeitos industriais de cerâmica vermelha da cidade de Caruaru-PE, recomenda-se a substituição de 20% do agregado. Tal teor forneceu índice de consistência normal dentro do padrão adotado, bem como resultados satisfatórios de densidade, retenção de água e resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias por efeito filler.

## **5 SUGESTÕES DE ENSAIOS FUTUROS**

- Avaliação microestrutural dos compósitos de melhor desempenho (MEV, DRX, FRX);
- Verificação da resistência à tração da argamassa aplicada ao substrato para verificação da aderência;
- Método do cachimbo para verificação da porosidade e da permeabilidade in loco.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5752/2012 – Materiais pozolânicos — Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland — Índice de atividade pozolânica com cimento — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15895 - Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método de Chapelle Modificado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9776 - Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13277 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 23 - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BAHIENSE, A. V. et al. **Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água.** *Cerâmica*. São Paulo, v. 54, n. 332, Dec. 2008.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento portland pozolânico na região de Curitiba, Parana-Brasil.** (Dissertação). 2010, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, UFPR. Curitiba/Paraná, 2010.

FONSECA, A.D.P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural.** Uberlândia, MG. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Civil. Dissertação de mestrado. 2006.

MONTANHEIRO, Tarcísio José et al . **Vidro vulcânico maciço: pozolana natural no oeste paulista.** Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 11, n. 1, abr. 2011 . Disponível em <[http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1519-874X2011000100004&lng=pt&nrm=iso](http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-874X2011000100004&lng=pt&nrm=iso)>. Acessos em 31 ago. 2012.

RONDON, O.C. **Atividade Pozolânica de Blocos Cerâmicos Produzidos em Laboratório.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2007. 260 p.

SILVA, Narciso G. ; BUEST, Guilherme; CAMPITELI, Vicente C. **Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas.** In: Simpósio Brasileiro de tecnologia de Argamassas. 6º, Florianópolis, 2005. Anais, ANTAC, 2005.

SILVA, Narciso G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Curitiba, PR. UFPR. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – PPGCC/UFPR, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, 2006.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do Reaproveitamento de Resíduo de Cerâmica Vermelha como Substituição Pozolânica em Argamassas e Concreto.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2005. 107 p.