UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO

ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA.

JESSYCA PRISCYLLA DE ALMEIDA NUNES

Orientadora: Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Caruaru, Junho de 2015.

JESSYCA PRISCYLLA DE ALMEIDA NUNES

ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador (a): Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Caruaru, Junho de 2015.

Catalogação na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-124

N972a Nunes, Jessyca Priscylla de Almeida.
Argamassas de revestimento com substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica vermelha. / Jessyca Priscylla de Almeida Nunes. - Caruaru: O Autor, 2015.
92f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2015.
Inclui referências bibliográficas

1. Argamassa. 2. Cerâmica vermelha. 3. Resíduos sólidos. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da. (Orientadora). II. Título

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2015-117)

JESSYCA PRISCYLLA DE ALMEIDA NUNES

ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador (a): Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato ALUNO APROVADO COM NOTA_____.

Aprovado em: Caruaru, 01 de junho de 2015.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

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

Prof. Dra. Juliana Von Schmalz Torres _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dra. Sylvana Melo dos Santos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenadora da disciplina)

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho a minha mãe, Maria Goretti, que não mediu esforço para que eu chegasse até aqui, sem ela nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela confiança de me conceber este desafio e por acreditar que eu seria capaz de realizá-lo. Por estar sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis, e por não me permitir desistir. Sempre me fortalecendo e me guiando pelos caminhos que traçou pra mim.

Agradeço a minha mãe, Maria Goretti, por todo esforço, carinho, amor, dedicação, incentivos a mim dedicados. Por me ensinar que para conquistar vitórias é preciso ser perseverante e ter disciplina, andar por caminhos sinceros, éticos e honestos com a cabeça erguida. Agradeço ao meu pai, José Eriberto, por todo seu amor e carinho a mim dedicado.

Ao meu noivo, Thomas Fernandes, por toda a paciência que teve comigo em todo esse tempo, pela compreensão de sempre, por me apoiar, torcer por mim, por sempre saber exatamente o que falar quando eu mais preciso. E por todo o amor e alegria que ele trouxe pra minha vida. Você foi à pessoa que compartilhou comigo os momentos de tristezas e alegrias. Além deste trabalho, dedico todo meu amor a você.

Aos meus primos, tios, tias, e demais familiares, que sempre se dispuseram a me ajudar nos momentos que precisei. Aos meus amigos, tanto do período da graduação, quanto da vida, pelos ótimos momentos vividos juntos e pela torcida e apoio incondicional em todos os instantes.

À minha orientadora Ana Cecília Vieira da Nóbrega, por sua presença e tempo dedicado, pelo auxílio e paciência na elaboração deste trabalho. Seu incentivo e sua ajuda muito me influenciaram nesta trajetória. Minha eterna admiração.

A todos os professores, pelos ensinamentos e conhecimentos passados em sala de aula. Não só experiências profissionais, como também pessoais, ajudando-nos a compreender melhor a vida e todas as dificuldades que nós estaremos sujeitos ao sair da universidade.

A todos que fazem parte do Laboratório de Construção Civil. Em especial a técnica Fabiola, por se disponibilizar e colaborar com os ensaios da minha pesquisa e aos colegas de curso José Venâncio e Paloma Alcântara pelo companheirismo e pela valiosa colaboração para realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Pernambuco, por ter me concedido a oportunidade de cursar e concluir a graduação de bacharelado em engenharia civil.

Com todos vivi momentos felizes e partilhei minha vida, por isso meus sinceros e não suficientes, agradecimentos.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.
Charles Chaplin

RESUMO

ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA.

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 destino adequado, causando prejuízo a indústria, a administração pública e a sociedade. Nesse cenário, a presente pesquisa busca analisar a potencialidade da reutilização de resíduos de cerâmica vermelha, que foram coletados na forma de telhas e tijolos descartados no seu processo de produção, por uma indústria de Caruaru/PE, para a obtenção de uma argamassa sustentável, a ser utilizada propiciando um duplo benefício ao meio ambiente, tal como imobilizar este rejeito industrial, agregando–lhe valor, e reduzir o consumo de cimento, inerentemente forte emissor de CO_2 na atmosfera. O objetivo principal foi substituir parcialmente o cimento pelos resíduos de cerâmica vermelha com teores de substituição de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em relação à massa do cimento. O traço seco em volume escolhido da argamassa foi 1:2:9 (aglomerante: cal hidratada: areia seca), comumente usado para emboços, sendo o fator água/cimento fixo em todas as substituições para obtenção de um índice de consistência da argamassa de referência dentro do padrão estabelecido 260±5mm. O resíduo foi peneirado na malha #200 a fim de maximizar a possibilidade de efeito *filler*. Fez-se a comparação entre as propriedades da argamassa convencional e das recicladas, entretanto, as propriedades avaliadas nestes estudos parecem variar bastante em função das características físicas, químicas e mineralógicas dos resíduos utilizados. Desta forma, a necessidade da devida caracterização e análise destes resíduos segundo os diversos aspectos inerentes à sua utilização, tal como substituto parcial do cimento através de ensaios como índice de consistência, densidade, retenção de água e resistência à compressão e tração na flexão, avaliação do índice de atividade pozolânica, massa aparente e absorção de água por capilaridade. Ressalta-se que todos os ensaios seguiram as prescrições das normas técnicas da ABNT. A substituição parcial do cimento nas referidas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha em relação à massa de cimento é viável tecnicamente tanto em termos de propriedades no estado fresco quanto no estado endurecido.

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

ABSTRACT

Coating grout with partial replacement of cement by residues from red ceramics.

The productive chain of civil construction, the segment of the manufacture of tiles and bricks of red ceramic creates waste after burning, which usually doesn't have a proper destination, losing the industry, public administration and society. In this scenario, this research seeks to analyze the potential reuse of red ceramic waste, which were collected in the form of tiles and bricks thrown in their production process, from Caruaru / PE industry, to obtain a sustainable grout, in use providing a double benefit for the environment: immobilize this industrial waste, adding value to it, and reduce the consumption of cement, inherently strong emitter of CO_2 in the atmosphere. The main objective was to replace partially cement by red ceramic waste with substitution levels 2,5%, 5%, 7.5% and 10% in relation to the mass of cement. The dry dash desired volume of grout was 1: 2: 9 (binder: hydrated lime: dry sand), being fixed water/cement factor in all substitutions for obtaining a reference grout consistency index within the established standard 260 ± 5 mm. The residue was # 200 mesh sieves in order to maximize the possibility of *filler* effect. There was a comparison of the properties of conventional grout and recycled, however, since the properties evaluated in these studies appear to vary greatly depending on the physical, chemical and mineralogical characteristics of the waste used, one perceives the need for proper characterization and analysis of waste according to the various aspects related to its use as a partial substitute for cement through trials as consistency index, density, water retention and resistance to compression and tension in flexion, evaluation of pozzolanic activity index, apparent mass and absorption water by capillarity. It is noteworthy that all trials followed the requirements of the technical standards of the ABNT. The partial replacement of cement in the proportions of 2.5%, 5%, 7.5% red and 10% ceramic residue in relation to the cement mass is technically possible in terms of properties in the fresh state and hardened.

Keywords: Grout. Red Ceramic. Waste. Substitution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da aderência inicial.....41
Figura 2 – Fissuração da argamassa por retração secagem.....42
Figura 3 – Fluxograma das etapas e ensaios realizados na pesquisa.....49
Figura 4– Depósito de argila.....50
Figura 5 – Deposito de Resíduos.....51
Figura 6 – Imagem dos tijolos que foram coletados.....51
Figura 7 – Peneirado eletromecânico.....55
Figura 8 – Material retido em cada peneira.....55
Figura 9 – Argamassadeira eletromecânica de eixo vertical de 5 litros.....57
Figura 10 – Argamassas nos moldes ao ar livre.....58
Figura 11 – Medição do espalhamento.....60
Figura 12 – Esquema do funil de Büchner modificado.....61
Figura 13– Corpos-de-prova durante o ensaio.....64
Figura 14 – Corpos-de-prova no final do ensaio.....65
Figura 15 – Ensaio de flexão bi-apoiado.....66
Figura 16 – Corpo de prova após ensaio de tração na flexão.....66
Figura 17 – Ensaio de resistência a compressão.....67
Figura 18 – Corpo de prova após ensaio de compressão.....67
Figura 19 – Imagem do resíduo moído e peneirado e do resíduo apenas moído.....68
Figura 20 – Curva granulométrica da areia.....69
Figura 21 – Difratograma para o resíduo de cerâmica vermelha em estudo.....70
Figura 22 – Gráfico da consistência normal consistência da argamassa padrão e das substituída por resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%.....72
Figura 23 – Gráfico da retenção de água da argamassa padrão e das substituídas por resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%.....73
Figura 24 – Gráfico de densidade de massa para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.....74
Figura 25 – Gráfico de densidade de massa aparente para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vemelha.....76

Figura 26 – Coeficiente de capilaridade para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.....77
Figura 27 – Gráfico de resistência á compressão para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.....78
Figura 28 – Gráfico de resistência à flexão para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.....80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das pozolanas quanto às exigências Químicas.....30
Tabela 2 – Classificação das pozolanas quanto às exigências Físicas.....30
Tabela 3 – Propriedades das argamassas.....39
Tabela 4 – Nível de exigência da resistência aderência.....43
Tabela 5 – Exigências mecânicas e reológicas das argamassas.....44
Tabela 6 – Caracterização química do cimento.....53
Tabela 7 – Caracterização física do cimento.....53
Tabela 8 – Análise química da cal hidratada.....54
Tabela 9 – Análise física da cal hidratada.....54
Tabela 10 – Massa unitária do cimento, cal e areia (g/cm³).....56
Tabela 11 – Consumos de CaO das amostras de resíduo.....69
Tabela 12 – Conversão do traço em volume para o traço em massa.....71
Tabela 13 – Quantitativos de materiais utilizados nas formulações.....71
Tabela 14 – Classificação da retenção de água segundo a NBR 13281.....73
Tabela 15 – Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado fresco segundo NBR 13281.....75
Tabela 16 – Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado endurecido NBR 13281 (2005).....76
Tabela 17 – Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade- NBR 13281 (2005).....77
Tabela 18 – Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 14 dias segundo a NBR 13281 (2005).....79
Tabela 19 – Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 28 dias segundo a NBR 13281 (2005).....79
Tabela 20 – Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 56 dias segundo a NBR 13281 (2005).....79
Tabela 21 – Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 90 dias segundo a NBR 13281 (2005).....80
Tabela 22 – Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 14 dias segundo a NBR 13281 (2005).....81

Tabela 23 – Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 28 dias segundo a NBR 13281 (2005).....81
Tabela 24 – Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 56 dias segundo a NBR 13281 (2005).....82
Tabela 25 – Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 90 dias segundo a NBR 13281 (2005).....82

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação que calcula o índice de atividade pozolânica pelo método químico de Chapelle Modificado.....52
Equação 2 – Equação para o cálculo da retenção de água.....61
Equação 3 – Equação para o Cálculo do volume.....62
Equação 4 – Equação para calcular a densidade de massa.....62
Equação 5 – Equação para calcular a massa aparente.....63
Equação 6 – Equação para o cálculo da absorção de água por capilaridade.....64
Equação 7 – Equação para o cálculo do coeficiente de capilaridade.....64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

– Abertura Mesh da peneira

% – Percentual

(OH) – Hidroxila

°C – Graus Celsius

a/c – Fator água-cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 – Óxidos de alumínio

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

$Ca(OH)_2$ – Hidróxido de cálcio

$Ca(OH)_2$ – hidróxido de cálcio

CAA – Centro Acadêmico do Agreste

$CaCO_3$ – Carbonato de cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

CH – Hidróxido de cálcio

cm – Centímetro

CO_2 – Dióxido de carbono

Fe_2O_3 – Óxidos de ferro

FIEPE – Federação das Indústrias do Estado de Pernambuco

GPEMAT – Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais, do Centro Acadêmico do Agreste.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

MF – Módulo de finura

$Mg(OH)_2$ – Hidróxido de magnésio

mm – Milímetros

Mpa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira Registrada

PE – Pernambuco

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1 Introdução 19

1.1 Relevância do Tema 21

2 Objetivo 23

2.1 Objetivo Geral 23

2.2 Objetivos Específicos 23

3 Referencial Teórico 24

3.1 Cerâmica Vermelha 24

3.1.1 Matéria-Prima 24

3.1.2 Processo de Fabricação 25

3.1.3 Produtos 25

3.2 Resíduos 27

3.2.1 Potencial para a Reciclagem 28

3.2.2 Utilização de Resíduos Cerâmicos. 28

3.3 Atividade Pozolânica 29

3.3.1 Classificação dos Matériais Pozolânicos 29

3.4 Efeito *Filler* 31

3.5 Argamassa 31

3.5.1 Definição 31

3.5.2 Classificação das Argamassas Segundo a NBR 13529:2013 32

3.5.3 Composição e Dosagem das Argamassas 33

3.5.4 Conceito de Revestimento 38

3.5.5 Propriedades da Argamassa 39

4 Estado da Arte 47

5 Materiais e Métodos 49

5.1 Material de Partida 50
5.1.1 Resíduo de Cerâmica Vermelha 50
5.1.2 Cimento Portland 52
5.1.3 Cal Hidratada 54
5.1.4 Agregado Miúdo (areia) 54
5.1.5 Água 56

5.2 Produção das Argamassas 56
5.2.1 Desenvolvimento das Formulações 56
5.2.2 Preparo das Argamassas 57
5.2.3 Moldagem dos Corpos de Prova 58

5.3 Avaliação das Propriedades no Estado Fresco 58
5.3.1 Índice de Consistência 59
5.3.2 Retenção de Água 60
5.3.3 Determinação da Densidade de Massa 61

5.4 Avaliação no Estado Endurecido 62
5.4.1 Massa Aparente 63
5.4.2 Absorção de Água por Capilaridade 63
5.4.3 Resistência à Compressão e à Tração na Flexão 65

6 Resultados e Discussões 68

6.1 Obtenção do Resíduo Cerâmico Via Indústria 68
6.2 Caracterização dos Materiais de Partida 68
6.3 Verificação da Atividade Pozolânica do Resíduo de Cerâmica Vermelha 69
6.4 Definição do Traço da Argamassa 70
6.5 Propriedades das Argamassas no Estado Fresco 71
6.5.1 Índice de Consistência 71
6.5.2 Retenção de Água 73
6.5.3 Densidade de Massa no Estado Fresco 74

6.6 Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido 75
6.6.1 Massa Aparente 75

6.6.2 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade 77
6.6.3 Resistência à Compressão 78
6.6.4 Resistência à Flexão 80

7 Considerações Finais 83
Referências 84

1 Introdução

Com o aquecimento do setor da construção civil, a demanda por materiais de construção está cada vez maior, pois, não há desenvolvimento econômico sem construir, sendo assim, a indústria da construção civil necessita cada vez mais de novas tecnologias e materiais para o mercado.

Com esse aumento no desenvolvimento das indústrias, elas vêm cada vez mais gerando resíduos, esses resíduos representam uma ameaça significativa para o equilíbrio do meio ambiente, por não ter um tratamento adequado.

O reaproveitamento de resíduos aparece nos dias atuais como questão fundamental na melhoria do meio ambiente, tanto em função da redução de desperdícios de recursos naturais, quanto na minimização dos impactos ambientais oriundos da disposição final dos resíduos. Essa percepção ambientalista originou a chamada ‘era ecológica’ que provocou o surgimento de uma legislação ambiental mais rigorosa, obrigando o gerador dos resíduos buscar um destino adequado e viável sem agredir ao meio ambiente.

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, gerando prejuizos a indústria, a administração pública e a sociedade. O diagnóstico destes resíduos é conhecido e mostra que a quantidade gerada é significativa e que existe um potencial para sua reciclagem na construção civil, devendo tal possibilidade ser investigada (FONSECA, 2006).

Resíduos pulverizados de cerâmica vermelha têm gerado resultados promissores na literatura como possíveis pozolanas. Se for comprovado que o resíduo de cerâmica vermelha apresenta atividade pozolânica, os resíduos podem ser utilizados como substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos (CORDEIRO, 2009). Esse fato é extremamente positivo em termos econômico e ambiental já que na produção do cimento Portland os impactos ambientais ocasionados pela extração de argila e calcário (suas principais matérias-primas), pelo alto consumo energético e pela elevada taxa de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera são os efeitos considerados mais danosos dessa indústria. Estima-se que para cada tonelada de cimento produzida outra tonelada de dióxido de carbono seja lançada no ar, contribuindo desta forma para o aumento do aquecimento global (ALVES, 2002; METHA & MONTEIRO, 2008).

Uma revisão da literatura pertinente às pesquisas envolvendo este tipo de resíduo como substituto parcial do cimento revelou a existência de extensivos referências acerca dos

benefícios incorporados às propriedades mecânicas de argamassas e concretos contendo esta adição. Entretanto, uma vez que as propriedades avaliadas nestes estudos parecem variar bastante em função das características físicas, químicas e mineralógicas dos resíduos utilizados, percebe-se a necessidade da devida caracterização e análise destes resíduos segundo os diversos aspectos inerentes à sua utilização como substituto parcial do cimento.

Baseados em trabalhos já previamente desenvolvidos no grupo de pesquisa GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais, do Centro Acadêmico do Agreste da UFPE), verificou-se que argamassas com adição de resíduos de cerâmica vermelha ganham coloração alaranjada quando endurecidas, além de agirem positivamente, por efeito *filler* e aumento de consumo de cálcio do sistema.

O presente trabalho propõe a utilização e aproveitamento pozolânico de cerâmicas vermelhas calcinadas na região agreste pernambucana, uma vez que essa caracterização precisa ser realizada localmente, em argamassas de revestimento com substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica vermelha com atividade pozolânica.

Entre os materiais utilizados como matriz sólida para incorporação de resíduos destaca-se a argamassa de revestimento, que foi adotada neste trabalho para a incorporação desses resíduos por não ser estrutural (não necessita de resistências compressivas elevadas) e apresentar alto índice de utilização em construções horizontais e verticais, seja em habitações populares ou em habitações de alto nível social. No entanto, é importante saber que todos os constituintes têm influência nas características da argamassa e no comportamento do revestimento. Assim, é necessário testar a argamassa, avaliar o seu comportamento, verificando tanto os aspectos funcionais como os estéticos.

O sucesso do trabalho refletirá em benefícios para as indústrias cerâmicas, para o meio ambiente, para a população em geral a parti da utilização de materiais de construção de menor custo bem como para as fábricas de argamassas que poderão trabalhar também nas certificações e selos ambientais e materiais ecologicamente sustentáveis, temas tão exacerbados na atualidade.

1.1 Relevância do Tema

A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. Segundo pesquisas, a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos naturais que são extraídos do planeta.

A escolha da indústria de cerâmica vermelha está intrinsecamente ligada ao baixo grau relativo de industrialização da região Nordeste. Nessa região em especial, a indústria de cerâmica vermelha é uma das principais atividades industriais, e poucas foram às contribuições para o seu crescimento sustentável.

A indústria cerâmica constitui um setor de relevante importância nacional. Segundo a ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica) em 2014, o mercado de cerâmica vermelha possui no Brasil cerca de 6.903 empresas entre cerâmicas e olarias, sendo responsável por mais de 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos, gerando um faturamento anual de R$ 18 bilhões (4,8% do faturamento da indústria da construção civil).

Segundo dados coletados da indústria de cerâmica vermelha Kitambar de Caruaru-PE parceira desta pesquisa, o seu índice de perdas mensal é cerca de 5%, resultando no descarte de aproximadamente 60.000 peças de tijolos por mês. Isto é equivalente a cerca de 138 toneladas de rejeitos industriais ou ainda a 17,3 casas populares. A esse grande volume, estão associados a dificuldade de descarte desses resíduos e o fato de ainda não ter sido encontrado uma alternativa de utilização total desse montante.

Esses resíduos gerados causam um grande impacto ambiental se não possuírem um destino certo e viável. Nesse contexto, um dos desafios para os pesquisadores da atualidade, na busca pelo desenvolvimento sustentável, seria então a investigação de processos para a obtenção de materiais alternativos, que permitam o emprego de resíduos urbanos diversos na fabricação de materiais e produtos duráveis, destinados, por exemplo, à construção de moradias populares de baixo custo.

Por outro lado, segundo o SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), a produção de cimento no Brasil em 2011 foi de 64.093.000 toneladas e teve um consumo aparente de 64.972.000 toneladas. Portanto, foram lançados na atmosfera mais de 64 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) em 2011.

De fato, em razão da descarbonização do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) durante sua calcinação e da combustão necessárias no seu processo de produção, a indústria do cimento é atualmente responsável por cerca de 7% da emissão mundial de dióxido de carbono (TOLEDO FILHO, 2001). Estes aspectos inerentes à produção do cimento têm feito de sua

indústria um dos principais assuntos nas discussões internacionais tais como, a Convenção do Rio de Janeiro, em 1992 e o acordo de Kyoto, em 1997. Dentre as iniciativas para a redução de gases poluentes, a indústria européia tem proposto o aumento do uso de materiais de substituição do clinquer, em especial, o *filler* calcário, cujo teor de substituição pode atingir 35%.

É nesse cenário que o presente trabalho justifica o estudo que envolva o reaproveitamento do resíduo na produção das argamassas de revestimento com substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica vermelha. Devido a possível melhoria das propriedades da argamassa, através do efeito *filler*, com a possibilidade de redução de custo na produção das argamassas sustentáveis. Ao passo que, o resíduo cerâmico já incorpora benefícios relativos à preservação do meio ambiente, contribuindo deste modo para a sustentabilidade. Além de reduzir o lançamento de dióxido de carbono no ar, contribuindo desta forma para a redução do aquecimento global.

2 Objetivo

2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse estudo é avaliar como a substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica vermelha, altera as propriedades das argamassas de revestimento.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar caracterização físico-química do resíduo de cerâmica peneirado em malha #200 (75 µm);

- Desenvolver formulações de argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de cerâmica vermelha em relação a massa de cimento, até o limite onde a maior adição ficar dentro da faixa de consistência recomendada pela NBR 13276 (2005) de 260 ± 5 mm;

- Verificação de pozolanicidade do resíduo produzidas com a substituição parcial do cimento por resíduo de cerâmica vermelha;

- Avaliar as propriedades no estado fresco das formulações de argamassa com resíduo em relação a argamassa padrão, tomando como base as normas da ABNT para caracterização de argamassas;

- Avaliar as propriedades no estado endurecido das formulações de argamassa com resíduo em relação a argamassa padrão, tomando como base as normas da ABNT para caracterização de argamassas.

3 Referencial Teórico

3.1 Cerâmica Vermelha

A cerâmica vermelha ou estrutural, como é conhecida, compreende os materiais cerâmicos formados por blocos de vedações e estruturais, tijolos, telhas, lajotas, manilhas, pisos rústicos e materiais ornamentais.

Sua fabricação utiliza matérias-primas como argilas e siltes argilosos, com certo teor de impurezas. Possui boa durabilidade, boa resistência mecânica e baixo custo, o que a torna um dos principais materiais utilizados na construção civil.

A exigência técnica dos produtos de cerâmica vermelha é mais rigorosa para telhas e blocos estruturais, requerendo maior sinterização das peças.

Segundo a ANICER (2014) o mercado de cerâmica vermelha possui no Brasil cerca de 6.903 empresas entre cerâmicas e olarias, sendo responsável por mais de 293 mil empregos diretos, 900 mil indiretos e gerando um faturamento anual de R$ 18 bilhões (4,8% do faturamento da indústria da construção civil).

Na cidade de Caruaru-PE, existem 10 indústrias de cerâmica vermelha cadastradas no banco de dados do ano de 2010 da Federação das Indústrias do Estado de Pernambuco (FIEPE), além de diversas olarias informais de menores portes, onde não existem sistemas para recuperação desses resíduos, nem, em sua grande parte, qualquer controle sobre a sua disposição.

3.1.1 Matéria-Prima

O principal componente da matéria-prima da cerâmica vermelha é a argila. Argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire plasticidade quando umedecido com água.

Plasticidade entende-se como a propriedade de o material úmido apresentar deformação, sem romper, pela aplicação de uma tensão, sendo que a deformação permanece após a retirada da tensão.

O conhecimento da constituição química das matérias-primas é fundamental para o processo de fabricação da cerâmica vermelha. Os componentes das matérias-primas cerâmicas podem ser classificados como plásticos e não plásticos.

As matérias-primas plásticas constituem as argilas e outros filossilicatos. Conferem importantes características na fase de conformação das peças cerâmicas, tais como a

trabalhabilidade e resistência mecânica a cru, e no processamento térmico, como cor e estrutura.

3.1.2 Processo de Fabricação

A indústria cerâmica é caracterizada por duas etapas distintas, a primária (que envolve exploração da matéria-prima neste caso, a argila) e a de transformação (para elaboração do produto final).

Independentemente de essas fases serem ou não desempenhadas pela mesma empresa, elas estão intimamente interligadas e interferem no desempenho de toda a cadeia produtiva.

Na sequência do processo de fabricação, a massa é umidificada acima do limite de plasticidade (geralmente acima de 20%), e processada em misturadores e homogeneizadores rústicos, sendo conformadas a seguir em extrusoras (marombas), quando adquirem as suas formas finais (blocos, lajes, lajotas, tubos) ou seguem para prensagem (telhas) ou tornearia (vasos).

Na queima, que acontece nos fornos, as peças são submetidas a temperaturas que variam entre 800 a 1.000 ºC. O processo de queima constitui o de maior consumo energético no processo produtivo.

3.1.3 Produtos

O setor de cerâmica vermelha no Brasil gera, como seus produtos principais, tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, lajotas, ladrilhos vermelhos, tubos e agregados leves. Neste trabalho serão abordados os produtos blocos e telhas.

3.1.3.1 Blocos

Os blocos cerâmicos são componentes construtivos utilizados em alvenaria (vedação ou estrutural). Apresentam furos de variados formatos, paralelos a qualquer um dos seus eixos

A conformação ocorre por extrusão, onde a massa de argila é pressionada através do molde que dará a forma da seção transversal. A coluna extrudada, passa por um cortador, onde se tem a dimensão do componente, perpendicular a seção transversal.

Posteriormente os blocos são submetidos a secagem e a queima, que é feita a temperaturas que variam entre 900 °C e 1.000 °C.

São dois os tipos de blocos cerâmicos utilizados na construção civil, produzidos no Brasil:

- Blocos de vedação – são aqueles destinados a execução de paredes que suportarão o peso próprio e pequenas cargas de ocupação (armários, pias, lavatórios, etc). Geralmente apresentam furos na horizontal e com atual tendência ao uso com furos na vertical.
- Blocos estruturais - são aqueles que além de exercerem a função de vedação, também são destinados à execução de paredes que constituirão a estrutura resistente da edificação (podendo substituir pilares e vigas de concreto). Estes blocos são utilizados com os furos sempre na vertical. Quando apresentam elevada resistência mecânica e padronização das dimensões, concorrem tecnicamente e economicamente com as estruturas de concreto armado.

3.1.1.2 Telhas

As telhas cerâmicas são componentes utilizados para coberturas, empregadas praticamente em todas as regiões do país, apresentando variadas conformações e características técnicas.

São fabricadas geralmente com matéria-prima melhor selecionada e preparada, face às características que deverão ser compatíveis com as exigências tecnológicas do produto.

A massa argilosa é conformada por extrusão na forma de um bastão com seção quadrada ou cilíndrica e cortada em segmentos compatíveis com o volume da telha. Posteriormente são prensadas, obtendo-se a forma final do produto através do molde tipo macho e fêmea (de gesso, metal ou borracha). Passam pelo processo de secagem e em seguida são queimadas a temperaturas entre 900 °C e 1.100 °C.

Verifica-se no país uma grande diversificação de telhas que variam de região para região, causando uma desordenação no mercado. Pois existem telhas de mesma forma, mas com dimensões bastante diferenciadas.

As telhas cerâmicas apresentam poucas variações dimensionais quando submetidas a variações térmicas e de umidade, o que é um fato positivo em um país que apresenta temperaturas altas, principalmente no verão.

Dispensam elementos adicionais ou acessórios para obter impermeabilidade da cobertura devido ao perfeito encaixe de seus componentes. São duráveis e têm bom desempenho no que se refere a conforto térmico.

Por outro lado, são frágeis e demandam cuidado especial durante o transporte e instalação, para evitar perdas. Seus preços elevados às tornam de difícil acesso para

consumidores de baixa renda, mas são as preferidas para construções residenciais de melhor padrão.

3.2 Resíduos

Segundo a NBR 10004 (2004) os resíduos sólidos podem ser definidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

A NBR 10004 (2004) também destaca características que um resíduo, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas.

A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

O destino final destes resíduos é de responsabilidades dos seus geradores, porém, nem sempre os produtores deste resíduo dão a ele um destino ambientalmente correto, muitas vezes porque as cidades não oferecem um local adequado para que este resíduo seja lançado sem que afete o meio ambiente.

Em geral, todo processo construtivo gera desperdícios, ou resíduo. Não é diferente com a produção dos materiais para construção civil. Esse desperdício tem um custo. Para diminuir esses custos, primeiramente, pensa-se em minimizar os desperdícios ou até em gerar a menor quantidade de resíduo possível. Diminuindo assim as despesas para dar ao resíduo um destino correto.

Dentre os métodos de gerenciamento de resíduos, não há dúvidas que a melhor prática é a redução de resíduos na fonte. Como enuncia um ditado popular: “é melhor prevenir do que remediar”, entretanto, quando não é possível a redução na fonte e os resíduos são produzidos, as técnicas de reutilização devem ser utilizadas.

A reutilização dos resíduos, bem como a redução na fonte, apresentam vantagens de ordem econômica e comercial. De ordem econômica, devido ao melhor aproveitamento da matéria-prima, redução ou eliminação de pagamentos de multas ou problemas com os órgãos ambientais, além do estudo e aumento do nível de controle do processo de produção. As vantagens comerciais são observadas na melhora da imagem da empresa, a facilidade de obtenção de certificados de qualidade ou ecológicos nos produtos e/ou processos, que podem refletir no aumento da competitividade, resultando na conquista de mercados consumidores internacionais, além de crescimento do mercado interno.

Outra alternativa seria agregar um poder econômico a esse “lixo” reaproveitando-o nos processos construtivos.

As pesquisas de tecnologias de reciclagem de resíduos industriais como materiais de construção encontram-se bem desenvolvidas, no entanto tem se concentrado principalmente nas áreas de cimento, concreto e argamassas.

3.2.1 Potencial para a Reciclagem

A reciclagem e a reutilização de resíduos provenientes de diferentes processos industriais, como novos materiais para a construção civil têm sido cada vez mais desenvolvidas em diferentes linhas de pesquisa: reaproveitamento de cinzas (carvão, casca de arroz), areia de fundição, lodos de estações de tratamentos, rejeito da produção do ácido fosfórico, entulhos da construção civil, rejeitos de minas de carvão, dentre outros, com uma abordagem voltada ao desempenho estrutural do novo produto (CAVALCANTE ROCHA; CHERIAF, 1996).

Para a seleção de possíveis aplicações dos resíduos, tendo em conta os aspectos tecnológicos, o conhecimento de sua composição e a sua caracterização se faz necessária, envolvendo aspectos químicos, físicos, e mecânicos que irão interferir na qualidade e durabilidade das aplicações.

Com base na caracterização dos resíduos podem ser selecionadas formas de reciclagem que maximizem o seu potencial intrínseco e que apresentem vantagens competitivas potenciais em termos de desempenho e não somente em termos de preço ou custo.

3.2.2 Utilização de Resíduos Cerâmicos.

A adição de resíduos de cerâmica vermelha em compósitos cimentícios é um tema bastante abordado na literatura. 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 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 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.

No entanto, se a cerâmica vermelha não apresentar características pozolânicas (que dependem de fatores tais quais composição química e temperatura de calcinação nos fornos das indústrias) ainda há a viável opção de aproveitar o material inerte como agregado artificial, agindo como *filler*, após beneficiamento granulométrico do resíduo.

O conhecimento detalhado de todas as etapas do processo produtivo de revestimento cerâmico é de vital importância para a avaliação precisa dos aspectos econômicos e ambientais.

3.3 Atividade Pozolânica

Segundo Nobrega (2007) atividade pozolânica é a capacidade que a substância possui de reagir com o $Ca(OH)_2$ residual durante as reações de cimento e evitando que seja formada Portlandita, que por seus cristais grandes e solúveis, é prejudicial ao comportamento do sistema como um todo em termos de resistência e porosidade. Por outro lado, a suposta substância com atividade pozolânica, ao reagir com o $Ca(OH)_2$ disponível, é capaz de gerar mais matriz C-S-H, a matriz de maior presença, densa e fechada do sistema, responsáveis por resistência e baixa porosidade.

Mehta e Monteiro (2008) define como materiais pozolânicos, aqueles silicosos ou sílico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

Complementando, Silva (2007) diz que os materiais pozolânicos, podem ser de origem natural, como cinza vulcânica e terra diatomácea, ou resultante de algum processo industrial, como cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz, e argila calcinada. As pozolanas artificiais ainda podem ser obtidas através de tratamentos térmicos (calcinação) de materiais com constituição predominantemente siliciosa.

3.3.1 Classificação dos Matériais Pozolânicos

A NBR 12653 (1992) classifica os materiais pozolânicos, utilizando requisitos químicos e físicos, em três classes (Classe N, Classe C e Classe E). Onde:

- Classe N: Pozolanas naturais e artificiais que obedeçam aos requisitos aplicáveis na citada norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- Classe C: Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedece aos requisitos aplicáveis na citada norma;
- Classe E: Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta NBR.

Os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas respectivamente nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Classificação das pozolanas quanto às exigências químicas.

Propriedades	**Classes de Material Pozolânico**		
	N	**C**	**E**
$SiO_2 + Al2O_3 + FeO_3$, % mín.	70	70	50
SO_3	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % mín.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na_2O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 1992).

Tabela 2 - Classificação das pozolanas quanto às exigências físicas.

Propriedades	**Classes de Material Pozolânico**		
	N	**C**	**E**
Material retido na peneira 45 μm, % Máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
Com cimento aos 28 dias em relação ao controle, % mín.	75	75	75
Com a cal aos 7 dias, em MPa.	6,0	6,0	6,0
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 1992).

3.4 Efeito *Filler*

Efeito *filler* é a diminuição da porosidade do sistema promovido pelo preenchimento dos vazios. Se dá pelo aprisionamento de partículas minúsculas que ocupam os vazios que existem no meio. Quando acontecem as reações químicas de hidratação do cimento Portland cristais são formados e vazios surgem entre eles, o preenchimento desse vazio por partículas pequenas se da o nome de efeito *filler*.

Desta forma, as partículas extremamente reduzidas do *filler* atraem para si as demais partículas presentes na mistura através da atração eletrostática, promovendo aumento da superfície efetiva de contato com água e, consequentemente, aceleração das reações de hidratação dos compostos.

Como a atividade cimentícia dos constituintes do clínquer é determinada por reações de superfície, a área específica efetiva de contato com o meio aquoso desempenha um papel muito importante na cinética das reações químicas (CORDEIRO, 2006).

3.5 Argamassa

3.5.3 Definição

Segundo Petrucci (2003), as argamassas podem ser definidas como materiais de construção constituídos por uma mistura íntima de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e de água. Além destes componentes essenciais, presentes nas argamassas, podem ainda ser adicionados produtos especiais com a finalidade de melhorar ou conferir determinadas propriedades ao conjunto.

A NBR 13281(2005) define as argamassas da seguinte maneira: mistura homogenia de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

As argamassas mais comuns são constituídas por cimento, areia e água. Em alguns casos, adicionam-se aditivos como cal, saibro, barro e outros, para a obtenção de propriedades especiais.

Assim como o concreto, as argamassas também se apresentam em estado plástico nas primeiras horas de confecção, e endurecem com o tempo, ganhando elevada resistência e durabilidade (MIRANDA, 2009).

As utilidades das argamassas são muitas, podem ser classificadas de acordo com sua função em:

- Argamassa de assentamento de tijolos e blocos, azulejos, ladrilhos, cerâmicas;
- Argamassa para revestimentos de paredes e tetos;
- Argamassa para impermeabilização de superfícies;
- Argamassa de regularização (tapar buracos, eliminar ondulações, nivelar e aprumar) de paredes, pisos e tetos;
- Argamassa decorativa.
- Argamassa de uso geral;

3.5.4 Classificação das Argamassas Segundo a NBR 13529 (2013)

As argamassas podem ser classificadas com relação a vários critérios, e segundo a NBR 13529 (2013):

- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- Quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento e de cimento e cal;
- Quanto à função do revestimento: argamassa de chapisco, de emboço e de reboco;
- Quanto sua consistência: secas, plásticas e fluidas;
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semipronta para argamassa;

Na construção civil são usualmente utilizadas argamassas de cal, argamassas de cimento e areia bem como as argamassas de cimento, cal e areia. Está última pode ser chamada de argamassa mista, pois tem o cimento e a cal como materiais aglomerantes.

3.5.4.2 Argamassa de Cal

Argamassa de cal é uma mistura de areia e cal. A cal proporciona uma compacidade maior preenchendo os vazios entre os grãos de agregados miúdos. A cal pode ser de dois tipos: a cal virgem e a cal hidratada. A primeira, para ser usada, deve passar por um processo de hidratação. Enquanto que a segunda pode ser comprada pronta.

A cal pode se apresentar em três estados para a mistura com o agregado na formação da argamassa: pasta, leite de cal ou pó.

A cal dá à argamassa uma boa trabalhabilidade e capacidade de reter água, entretanto, quando está endurecida, apresenta baixa resistência.

3.5.4.3 Argamassa de Cimento

Argamassa de cimento e areia são indicadas para suportar maiores cargas, pois possuem alta resistência. Argamassas ricas em cimento têm boa trabalhabilidade, porém são pouco econômicas. Para se obter o máximo de qualidade devem ser observados os cuidados com a estocagem e o prazo de utilização do cimento.

3.5.4.4 Argamassa Mista de Cimento e Cal

Argamassa mista de cimento e cal tem proporções adequadas de cada componente, cada qual contribuindo com suas características, formando uma mistura mais completa.

A função da cal é plastificante, por sua capacidade de reter água e ter trabalhabilidade. A função do cimento é dar resistência e aumentar a velocidade de endurecimento. Esse tipo de argamassa se adapta e é indicada para vários usos em alvenaria (seja ela estrutural ou não).

3.5.5 Composição e Dosagem das Argamassas

A composição da argamassa diz respeito aos seus materiais constituintes. Já a dosagem, comumente denominada de “traço da argamassa”, é referente à proporção da mistura dos materiais na argamassa. Os materiais constituintes das argamassas são:

- Aglomerantes;
- Agregados;
- Água de amassamento;
- Adições;
- Aditivos;

As argamassas utilizadas em obras são comumente compostas de areia natural lavadas (agregado) e aglomerantes, que são em geral o cimento e a cal hidratada. O adequado desempenho das argamassas depende fundamentalmente da correta escolha dos materiais e de suas quantidades, cujas operações são denominadas de dosagem (LARA, 1995).

Segundo Carneiro (1997), usualmente a composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços (massa ou volume) descritos ou especificados em normas internacionais ou nacionais, como Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT), Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e cadernos de encargos.

De acordo com o mesmo autor, para argamassas de revestimentos tem-se adotado com mais frequência os traços de dosagem 1:1:6 (cimento:cal:areia) e 1:2:9, em volume, numa proporção aglomerante: agregado de 1:3 ou 1:4. A escolha de um desses traços está de acordo com o desempenho esperado da argamassa ao longo do tempo, ou seja, sua durabilidade. No entanto, na prática identifica-se o emprego de traços mais pobres, como 1:4 a 1:9 (aglomerante: agregado), como constatou Campiteli (1995), não dando qualidade ao revestimento.

Embora publicações tenham investido esforços no desenvolvimento de dosagens mais adequadas, ainda existem muitas divergências na literatura brasileira (SILVA, 2006).

3.5.5.1 Composição das Argamassas Mistas

1. Cimento Portland

a) Fabricação e Composição Química

O cimento Portland é um material inorgânico finamente moído constituído principalmente por silicatos de cálcio, que na presença de água forma uma pasta que endurece através de uma reação química conhecida por hidratação e após seu endurecimento mantém a resistência mesmo em contato com água (LEA´s, 2004).

b) Hidratação do Cimento Portland

O processo de hidratação pode ser resumido pela reação entre a água e os silicatos e aluminatos presentes no cimento anidro. São dois os mecanismos de hidratação.

O primeiro é o mecanismo de dissolução-precipitação, que predomina nos primeiros momentos da hidratação e onde ocorre a dissolução dos compostos anidros em seus constituintes iônicos e a formação de hidratos na solução. O segundo mecanismo é o da hidratação no estado sólido, onde as reações ocorrem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro sem entrarem em solução (METHA; MONTEIRO, 2008).

2. Cal

A cal é um material aglomerante simples, que gerado pela calcinação de rochas calcárias, que se apresentam sob diversas variedades, com características resultantes da natureza da matéria-prima empregada e do processamento conduzido (MIRANDA, 2009).

A calcinação da rocha calcária pura resulta na produção de óxido de cálcio puro, material de grande importância industrial, onde alcança melhor preço que os produtos impuros normalmente utilizados em construção. Nas rochas calcárias naturais, o carbonato de cálcio é frequentemente substituído, em menor ou maior proporção, pelo carbonato de magnésio, que não constitui impureza propriamente dita. A sílica, os óxidos de ferro e de alumínio são as impurezas que acompanham os carbonatos, em maior ou menor grau, na constituição das rochas calcárias (MIRANDA, 2009).

Além das rochas calcárias, os depósitos de resíduos de esqueletos de animais, fornecem matéria-prima à produção de cal. Para obter uma cal de boa qualidade, é necessário que a calcinação seja completa e uniforme, o que fica mais facilitado quando se utilizam pedras não excessivamente grandes e quando o aquecimento é gradual e prolongado.

Estas condições são habitualmente reunidas nos processos de fabrico semi-artesanais, intermitentes (não contínuos) com aquecimento proporcionado por combustão de madeira (MIRANDA, 2009).

No Brasil a maioria da cal produzida é obtida pelo resultado da calcinação/dolomitos metamórficos de idades geológicas diferentes. Geralmente muito antiga (pré-cambriana) e possui pureza variável.

a) Aplicação da Cal

Nos dias atuais, com a utilização de aditivos cada vez mais difundidos que melhoram as propriedades das argamassas, a cal tem sido abandonada em muitos casos. No entanto, sabe-se que essa prática afeta a durabilidade do revestimento, como já observado em alguns países da Europa como, por exemplo, a França que tem a cal como um dos vários constituintes das argamassas (RAGO; CINCOTTO, 1999).

Dentre vários produtos de origem mineral, a cal tem uma ampla aplicação no Brasil tais como, na construção civil, na indústria (celulose, tintas, cerâmica, etc.), estabilização de solos, misturas asfálticas, na proteção do meio ambiente, tratamento de água, e também na obtenção de outros materiais (GUIMARÃES, 2002).

Segundo Rago e Cincotto (1999), a cal no estado fresco contribui para uma maior plasticidade à argamassa, permitindo melhor trabalhabilidade e, consequentemente, maior produtividade na execução do revestimento. Outra característica proporcionada pela cal no estado fresco, com base nesses autores, é a maior retenção de água, por não permitir sucção excessiva de água pela base.

Já no estado endurecido, a cal apresenta a capacidade de absorver deformações devido ao seu módulo de deformação. Esta propriedade, segundo Rago e Cincotto (1999), é de extrema importância no desempenho da argamassa, que deve acompanhar as movimentações da estrutura. A cal possibilita a diminuição da retração gerando menor variação dimensional, além de carbonatar lentamente ao longo do tempo, tamponando eventuais fissuras ocorridas no endurecimento, no caso de argamassa mista.

b) Cal Hidratada

A cal hidratada é um ligante constituído sobretudo por óxidos de cálcio, CaO ou hidróxidos de cálcio, $Ca(OH)_2$ que endurece lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono. Uma vez que não possuem propriedades hidráulicas, estas não endurecem em água. Ela resulta do prosseguimento do processo industrial que dá origem à cal virgem. A reação química é uma clássica "reação de fases sólido-líquidas". Dependendo do volume de água utilizada para a reação, o produto final ser seco ou com aspectos de creme, lama, leite ou soluções saturadas (GUIMARÃES, 2002).

3. Agregados Miúdos

Segundo a NBR 7211(2009) o agregado miúdo é definido como: "areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,150 mm".

O agregado miúdo é um material inerte, ou seja, não contribui com as reações químicas de hidratação das argamassas, sendo em alguns casos definido como o "esqueleto" dos sistemas de revestimento argamassados, com influência direta em propriedades como retração, resistência mecânica, módulo de deformação, dentre outras.

Segundo Mineropar (2004) os agregados têm três funções principais:

- Prover o aglomerante de um material de enchimento relativamente econômico;
- Prover a pasta de partículas adaptadas para resistir às cargas aplicadas, ao desgaste mecânico e à percolação da intempérie;

- Reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega, endurecimento e variações de umidade na pasta de cimento, cal e água

A análise granulométrica do agregado é o principal método de ensaio utilizado para se avaliar os diferentes tipos de agregados que compõem as argamassas de revestimento, esta análise consiste na determinação das dimensões das partículas e das proporções relativa sem que elas se encontram na composição.

Segundo Angelin (2003), a distribuição granulométrica do agregado miúdo/areia influencia diretamente no desempenho da argamassa produzida, afetando e/ou interferindo em suas propriedades, como por exemplo, na trabalhabilidade e no consumo de água e aglomerantes, no estado fresco. Já no estado endurecido, no caso do revestimento acabado, pode contribuir para o aumento de fissuração, na permeabilidade e na resistência a aderência.

Segundo Carneiro (1997), se a granulometria do agregado miúdo for muito uniforme, independentemente do formato dos grãos, compromete a trabalhabilidade da argamassa. Há um consequente enrijecimento, impedindo o deslizamento dos grãos da areia entre si, com demanda de um maior consumo de pasta.

Em geral, a areia é caracterizada pelo seu módulo de finura (MF), especificações de faixas granulométrica, ou selecionada a partir de normas, as quais especificam a granulometria dentro de certas faixas.

Não existe um consenso entre os autores nacionais, pois curvas granulométricas distintas podem levar ao mesmo módulo de finura. Algumas vezes utiliza-se também o coeficiente de uniformidade. O coeficiente de uniformidade traduz uma continuidade na distribuição granulométrica da areia.

De acordo com Selmo (1989), a classificação das areias segundo o módulo de finura (MF) é dividida em alguns intervalos, conforme segue abaixo:

- MF < 2.0 - areia fina;
- 2.0 < MF < 3.0 - areia média;
- MF > 3.0 - areia grossa.

Já NBR 7211(2009), criou alguns novos limites de utilização dos agregados miúdos. Antes esta norma classificava o agregado em 4 zonas: muito fino, fino, médio e grosso. Já na norma atualizada a classificação, conforme o módulo de finura é dividido em: zona utilizável

inferior (MF varia de 1,55 a 2,20), zona ótima (MF varia de 2,20 a 2,90) e zona utilizável superior (MF varia de 2,90 a 3,50).

3.5.4 Conceito de Revestimento

"O revestimento é a camada externa de uma superfície lisa ou áspera com uma ou mais camadas sobrepostas de argamassa, em espessura normalmente uniforme, apta a receber um acabamento final" (MIRANDA, 2009).

O revestimento de gesso, em geral, é composto por uma única camada, enquanto o revestimento tradicional de argamassa é composto por três camadas:

- Chapisco - camada inicial para aumentar a aderência ao substrato.
- Emboço - camada intermédia que ajuda a cobrir as irregularidades do substrato.
- Reboco - camada final de acabamento.

Atualmente, existem argamassas pré-misturadas que permitem a diminuição do número de camadas. Para a classificação dos revestimentos de paredes, podem ser usados vários tipos de critérios, com base, por exemplo, no material constituinte, na natureza do ligante, na técnica de execução ou na trabalhabilidade ou não do revestimento (MIRANDA, 2009).

3.5.4.1 Funções dos Revestimentos de Argamassa

As argamassas de revestimentos são uma das partes integrantes das vedações de edificações, que apresentam um conjunto de propriedades que irão contribuir para a obtenção do adequado comportamento das vedações (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

O revestimento tem como função proteger os elementos de vedação das edificações da ação direta dos agentes agressivos, auxiliar as vedações no cumprimento das suas funções, regularizar a superfície dos elementos de vedação, servir de base para aplicação de outros revestimentos ou constituir-se no acabamento final. Segundo Carasek (2007), as principais funções de um revestimento são:

- Proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo, no caso de revestimentos externos;
- Integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como: isolamento térmico (~30%), isolamento acústica (~50%), estanqueidade à água (~70 a 100%), segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais;

- Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação.

Para que estes revestimentos de argamassas possam cumprir adequadamente suas funções, eles precisam apresentar um conjunto de propriedades específicas, relativas à argamassa tanto no estado fresco como no estado endurecido. O entendimento dessas propriedades, bem como dos fatores que influenciam o comportamento destes materiais, permitem avaliar o comportamento do revestimento em diferentes situações de uso. As principais propriedades da argamassa estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades das argamassas.

Estado Fresco	**Estado Endurecido**
Massa específica e teor de ar	Aderência
Trabalhabilidade	Capacidade de absorver deformações
Retenção de água	Resistência mecânica
Aderência inicial	Permeabilidade
Retração na secagem	Resistência ao desgaste e Durabilidade

Fonte: Marciel; Barros; Sabbatini. (1998).

3.5.5 Propriedades da Argamassa

3.5.5.1 Propriedades da Argamassa no Estado Fresco

Avaliar as propriedades das argamassas no estado fresco é importante, pois elas que podem oferecer melhor acabamento, proporcionar maior facilidade de transporte e aplicação.

a) Massa Específica e Teor de Ar Incorporado

A massa específica é a relação entre a massa da argamassa e o seu volume, pode ser relativa ou absoluta. Na determinação da massa específica absoluta, não são considerados os vazios existentes no volume de argamassa. Já na relativa, também chamada massa unitária, consideram-se os vazios. A massa específica é imprescindível na dosagem das argamassas, para a conversão do traço em massa para traço em volume, que são comumente empregados na produção das argamassas em obra.

O teor de ar é a quantidade de ar existente em um determinado volume de argamassa. À medida que cresce o teor de ar, a massa específica relativa da argamassa diminui. De acordo com Maciel (1998) essas duas propriedades vão interferir em outras propriedades da argamassa no estado fresco, como a trabalhabilidade, que será tratada a seguir. Uma argamassa com menor massa específica e maior teor de ar, apresenta melhor trabalhabilidade.

b) Trabalhabilidade e Consistência

A trabalhabilidade é uma propriedade de avaliação qualitativa. Uma argamassa para revestimentos é considerada trabalhável quando (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998):

- Deixa penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida;
- Mantém-se coesa ao ser transportada, mas não adere à colher ao ser lançada;
- Distribui-se facilmente e preenche todas as reentrâncias da base;
- Não endurece rapidamente quando aplicada;

De acordo com Lourenci (2003) a trabalhabilidade em termos práticos seria a facilidade de manuseio por parte do operário que a aplica sendo alterada à medida que decresce o módulo de finura do agregado, mantém-se a continuidade da granulometria e decresce o teor de grãos angulosos.

A consistência é a propriedade da argamassa relacionada à trabalhabilidade que pode ser definida através de um índice. A NBR 13276 (2005) estabelece o método para determinação do índice de consistência da argamassa. No ensaio prescrito nesta norma utiliza-se o "*flow-table*", para se determinar o índice de consistência. Este índice é a média dos diâmetros que um tronco de cone de argamassa forma, após a mesa de abatimento subir e cair 30 vezes em 30 segundos de uma altura de 1cm.

As características dos materiais constituintes e a sua proporção nestas argamassas, podem interferir também diretamente na trabalhabilidade da mesma. Como, por exemplo, a presença de cal e de aditivos incorporadores de ar melhorar essa propriedade até um determinado limite (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

c) Retenção de Água

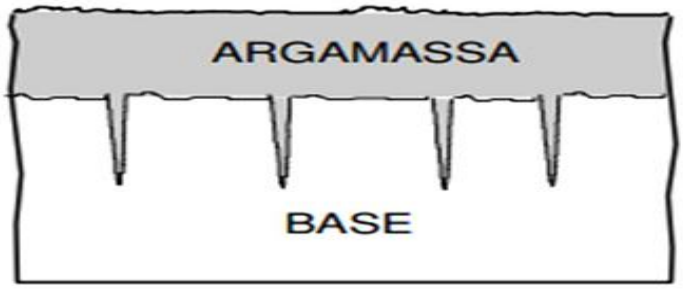
Representa a capacidade da argamassa de reter a água de amassamento contra a sucção da base ou contra a evaporação. A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativas, promovendo a adequada hidratação do cimento e consequente ganho de resistência.

De acordo com Lourenci (2003) a retenção de água seria a capacidade que a argamassa fresca tem de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água (evaporação, sucção, absorção pelo componente da mistura). A rápida perda de água compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações, a resistência mecânica, e, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento (devido à presença de fissuras no revestimento) e a vedação fica comprometida.

d) Aderência Inicial

Aderência inicial é a capacidade que a argamassa no estado fresco tem de aderir, ancorar na base em que está sendo aplicada. Está relacionado com o fenômeno mecânico que ocorre em superfícies porosas, pela ancoragem da argamassa na base, através da entrada da pasta nos poros da base, seguido do endurecimento progressivo da pasta, conforme a Figura 1.

Figura 1- Ilustração da aderência inicial.



Fonte: Maciel, (1998).

Esta aderência inicial também depende das outras propriedades da argamassa no estado fresco, das características da base onde será aplicada, condições de limpeza e da superfície de contado efetivo entre a argamassa e a base.

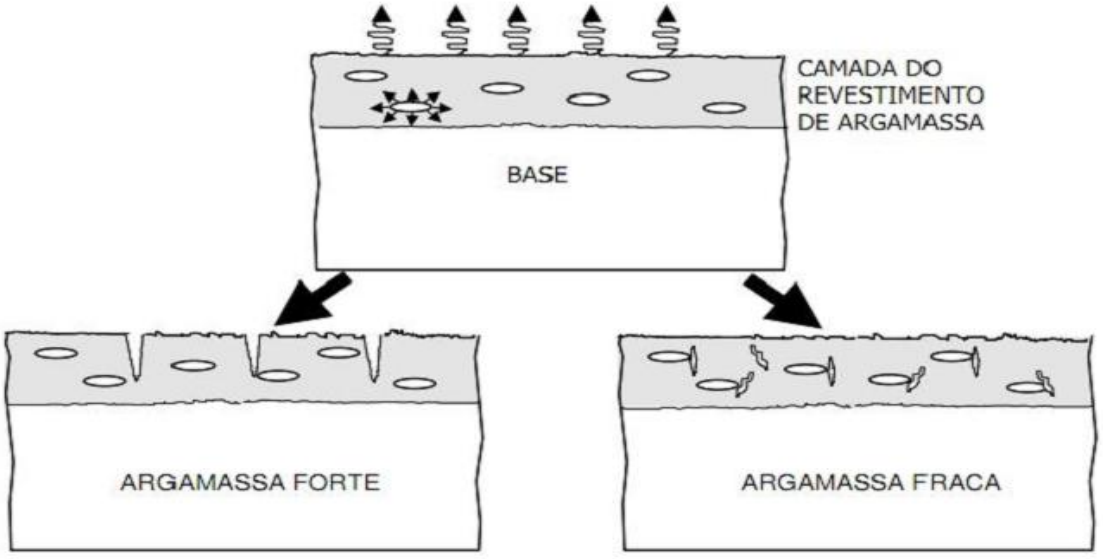
e) Retração na Secagem

Segundo Fiorito (1994), a retração das argamassas é o endurecimento acompanhado por uma diminuição de volume proveniente a perda da água por evaporação e/ou das reações de hidratação. Os fatores que influenciam essa propriedade são: as características e a proporção dos materiais constituintes da argamassa (principalmente pela quantidade de água adicionada na argamassa).

A determinação da retenção de água pode ser avaliada pelo método da NBR 13277 (2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água.

As argamassas com um alto teor de cimento, denominadas “fortes”, são mais sujeitas às tensões que causarão o aparecimento de fissuras prejudiciais durante a secagem, além das trincas e possíveis descolamentos da argamassa já no estado endurecido. Já as argamassas mais “fracas”, são menos sujeitas ao aparecimento das fissuras prejudiciais, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Fissuração da argamassa por retração na secagem: argamassa forte comparativamente a argamassa fraca.



Fonte: Marciel; Barros; Sabbatini. (1998).

Baía (2002) afirma que as argamassas de revestimento com espessuras maiores que 25 mm estão mais sujeitas ao aparecimento de fissuras devido a retração por secagem.

3.5.5.2 Propriedades da Argamassa no Estado Endurecido

As propriedades da argamassa no estado endurecido equivalem às propriedades do próprio revestimento.

a) Aderência

Segundo Maciel, Barros e Sabbatini (1998), a aderência é uma propriedade que o revestimento tem em manter-se fixo ao substrato, através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface base-revestimento. É resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa.

A aderência depende das propriedades da argamassa no estado fresco, dos procedimentos de execução do revestimento, da natureza e características da base e da sua limpeza superficial.

A resistência de aderência à tração do revestimento pode ser medida através do ensaio de arrancamento por tração. De acordo com a NBR 13749 (1996), o limite de resistência de aderência à tração para revestimentos de argamassa (emboço e massa única) varia de acordo com o local de aplicação e tipo de acabamento, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Nível de exigência da resistência aderência.

Local		**Acabamento**	**Ra (Mpa)**
Parede	Interno	Pintura ou base para reboco	$\geq 0{,}20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0{,}30$
	Externo	Pintura ou base reboco	$\geq 0{,}30$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0{,}30$
Teto			$\geq 0{,}30$

Fonte: NBR 13749, (1996).

b) Capacidade de Absorver Deformações

É a propriedade do revestimento de suportar tensões sem romper, sem apresentar fissuras prejudiciais e sem perder a aderência. O revestimento tem a responsabilidade de absorver as deformações de pequena amplitude, que ocorrem em consequência da ação da

umidade ou da temperatura, mas não as de grande amplitude, provenientes de outros fatores, como recalques estruturais (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

c) Resistência Mecânica

De acordo com Baía (2002) a resistência mecânica é definida como uma propriedade dos revestimentos de suportarem as ações mecânicas de diferentes naturezas.

Maciel *et al.* (1998) comentam que a propriedade depende do consumo e da natureza dos agregados e aglomerantes da argamassa empregada e da técnica de execução, que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento.

Santos (2008) ressalta que após o endurecimento as argamassas, seja de assentamento ou de revestimento, são submetidas a algum tipo de esforço mecânico. As argamassas de revestimento são submetidas à abrasão superficial, impactos, tensões de cisalhamento decorrentes de movimentação do substrato e variações térmico-higrométricas.

Baía (2002) evidencia que a resistência mecânica aumenta com a redução da proporção de agregado na argamassa e varia inversamente com a relação água/cimento da argamassa.

A NBR 13279 (2005) descreve o método para a determinação da resistência à compressão de argamassas para assentamento e revestimentos de paredes e tetos, no estado endurecido. A NBR 13281(2005) prescreve que os requisitos mecânicos e reológicos das argamassas devem estar em conformidade com as exigências indicadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Exigências mecânicas e reológicas das argamassas.

Características	**Identificação**	**Limites**	**Métodos**
Resistência à compressão aos 28 dias (Mpa)	I	≥ 0,1 e < 4,0	NBR 13279
	II	≥ 4,1 e ≤ 8,0	
	III	>8,0	
Capacidade de Retenção de água (%)	Normal	≥ 80 e ≤ 90	NBR 13277
	Alta	>90	
Teor de ar incorporado	A	< 8	NBR 13278
	B	≥ 8 e ≤ 18	
	C	≥ 8 e ≤ 18	

Fonte: NBR 13281, (2001).

d) Permeabilidade

De acordo com Baía (2002) permeabilidade é a propriedade do revestimento relaciona a passagem de água pela camada de argamassa, que é um material poroso e permite a percolação da água tanto no estado líquido como no de vapor. É uma propriedade bastante relacionada com o conjunto base-revestimento.

O revestimento deve ser estanque à água, impedindo a sua percolação. Mas, é recomendável que o revestimento seja permeável ao vapor para favorecer a secagem de umidade de infiltração (como a água da chuva, por exemplo) ou decorrente da ação direta do vapor de água, principalmente nos banheiros.

Quando existem fissuras no revestimento, o caminho para percolação da água é direto até a base e, com isso, a estanqueidade da vedação fica comprometida. Essa propriedade depende:

- Da natureza da base;
- Da composição e dosagem da argamassa;
- Da técnica de execução;
- Da espessura da camada de revestimento;
- Acabamento final;

e) Durabilidade e Resistência ao Desgaste

De acordo com Maciel, Barros e Sabbatini (1998), durabilidade é uma propriedade do período de uso do revestimento no estado endurecido e que reflete o desempenho do revestimento frente às ações do meio externo ao longo do tempo.

Alguns fatores prejudicam a durabilidade dos revestimentos, tais como: fissuração, espessura excessiva, cultura e proliferação de microorganismos, qualidade das argamassas e a falta de manutenção. De uma forma geral, a resistência ao ataque químico de materiais a base de cimento é regida por uma combinação de efeitos de transporte difusivo e reações químicas associadas às propriedades de permeabilidade, alcalinidade e composição química da pasta de cimento (NÓBREGA, 2007).

Na maioria das vezes, o resultado das reações químicas é a constituição de compostos de cálcio solúveis em água, os quais podem ser facilmente lixiviados, resultando em perda da capacidade de ligação entre os constituintes do concreto ou da argamassa deixando-os com uma superfície arenosa ou agregada exposta sem a pasta

superficial, com eflorescências de carbonato, com elevada retenção de fuligem e com risco de aumentar a quantidade de fungos e bactérias.

Assim, a incorporação de adições e/ou aditivos à massa cimentícia que alterem essas propriedades-chave acarretarão mudanças positivas ou negativas em seu comportamento quanto à durabilidade. Dentro da normatização brasileira não há uma norma específica para realização dos ensaios de resistência ao ataque químico, mas existem dois tipos de ensaios comumente reportados na literatura vigente: ensaios gravimétricos de ataque ácido acelerados e ensaios gravimétricos de degradação em tempo real.

4. Estado da Arte

Seguem alguns trabalhos realizados relacionados ao tema:

Fonseca (2006) produziu concretos com substituição parcial e total do agregado graúdo por agregado reciclado de telha cerâmica. Os concretos produzidos foram comparados nos estados fresco e endurecido, mantendo-se sob controle o abatimento do tronco de cone na produção dos mesmos, a um concreto de referência produzido com agregado natural. Os resultados referentes ao estado fresco dos concretos demonstraram que o consumo de água para a produção do concreto com agregado reciclado foi mais elevado e dependente da taxa de absorção de água do agregado. Já no estado endurecido foram testadas as propriedades de resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade. Os concretos com agregados reciclados, de uma maneira geral, apresentaram resistência mecânica mais baixa comparativamente aos concretos de referência. A substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado de telha provocou queda de 42% na resistência à compressão. Entretanto, a substituição parcial de 50% resultou em resistência à compressão mais próxima da resistência do concreto de referência.

Gonçalves (2006) estudou a utilização do resíduo da indústria cerâmica como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de concretos, avaliando parâmetros do comportamento tensão *versus* deformação, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e por compressão diametral. Os resultados demonstraram que a substituição de cimento por resíduo no teor de 20% não influenciou significativamente as resistências à compressão, à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos aos 28 dias, promovendo concretos com maior capacidade de deformação.

Vieira (2005) estudou o aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos. Investigou-se o efeito da finura de resíduos de cerâmica moído na sua atividade pozolânica, comparando-os com uma pozolana convencional utilizada na indústria de cimento. Avaliou-se também, dentre outros aspectos, o efeito da substituição do cimento por resíduo nas propriedades mecânicas de argamassas e concretos. Foram moldadas amostras desses compósitos com teores de substituição do cimento por resíduo cerâmico de 0%, 20% e 40% em massa, mantendo o fator água-cimento constante de 0,5 nas formulações. Os resultados demonstraram que o resíduo cerâmico estudado tem índices de atividade pozolânica satisfatórios, tanto para sistemas com cal quanto com cimento, apenas para finuras superiores a 5000 cm^2/g, havendo uma finura ótima para pozolanicidade em torno de 8000 cm^2/g. Amostras contendo 20 e 40% de substituição do

cimento pelo resíduo retiveram 95% e 89% da resistência das amostras de controle, respectivamente.

Brito (2005) estudou o comportamento mecânico de concreto não-estrutural, de lajes de pavimento, produzido com agregado reciclado de resíduo de cerâmica vermelha, provindo da indústria da construção civil. As formulações foram de substituição ao agregado graúdo nas proporções de 0% (concreto de referência), 2/3 e 3/3. As misturas tiveram a propriedade de trabalhabilidade constante. Três propriedades mecânicas foram testadas: resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à abrasão. Os resultados mostraram que as resistências à compressão e à flexão dos concretos tiveram seus valores diminuídos com o aumento do teor de substituição do agregado graúdo pelo resíduo. A resistência à compressão teve um decréscimo maior do que a resistência à flexão. Entretanto a resistência à abrasão do concreto feito com agregado cerâmico reciclado se apresentou maior do que a do concreto convencional.

Deste modo, pode-se perceber que a utilização de cerâmica vermelha como material alternativo em substituição ao cimento ou em substituição aos agregados, com beneficiamento de suas propriedades, seja pela atividade pozolânica, seja pelo efeito *filler*, respectivamente. É um viés promissor de destinação desses resíduos e incorporação dos mesmos em matrizes cimentícias.

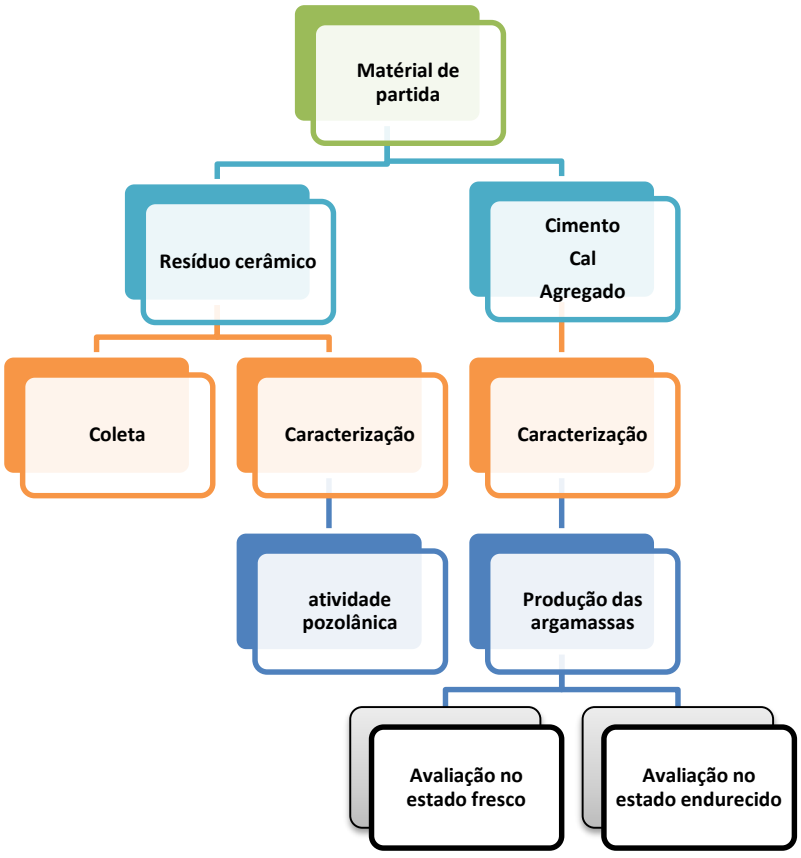
5 Materiais e Métodos

A metodologia experimental descrita a seguir foi elaborada utilizando como base o desenvolvimento das argamassas de revestimento com a substituição parcial, máxima quantidade possível, do cimento por resíduos de cerâmica vermelha. Para posteriormente, comparar seus desempenhos com uma argamassa de referência sem qualquer adição de resíduos. O resíduo de cerâmica vermelha entrou no sistema como substituição do cimento, em porcentagens de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em relação à massa do cimento.

Foram realizados estudos experimentais no Laboratório de Construção Civil (LCC) e no Laboratório de Química (LQ), situados na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Campus de Agreste. Nos ensaios foram considerados os desempenhos tanto no estado fresco quanto no endurecido, utilizando a normatização vigente estabelecida pela ABNT.

Todo processo experimental que fundamentará as conclusões do presente trabalho pode ser observado passo a passo através da Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma das etapas e ensaios realizados na pesquisa.



Fonte: Do autor, (2015).

5.1 Material de Partida

Para a produção das argamassas mistas foram utilizados: cimento, cal, areia, água e os resíduos de cerâmica vermelha. 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.

5.1.1 Resíduo de Cerâmica Vermelha

1. Coleta e Caracterização do Resíduo de Cerâmica Vermelha

Os resíduos de cerâmica vermelha foram coletados na indústria de cerâmica vermelha Kitambar de Caruaru-PE na forma de tijolos furados e telhas com dimensões variadas queimadas a 850 ºC e 950 ºC. Essa indústria foi escolhida como parceira por sua excelência em qualidade e controle de escolha das matérias-primas. As Figuras 4, 5 e 6 foram tiradas durante a visita a fábrica. A Figura 4 expõe o depósito de argila, já nas Figuras 5 e 6 pode ser visto respectivamente o depósito de resíduo e a imagem dos tijolos que foram coletados durante a visita.

Figura 4 - Depósito de argila.

Fonte: Do autor, (2013).

Figura 5 - Deposito de Resíduos.

Fonte: Do autor, (2013).

Figura 6 – Imagem dos tijolos que foram coletados.

Fonte: Do autor, (2013).

Para a sua caracterização e possível utilização como material pozolânico foi necessário que o mesmo sofresse um processo de moagem. Depois do resíduo moído, foi utilizado a peneira #200, de abertura 75μm, para obtenção de uma granulometria fina, próxima a do cimento. Essa escolha tem influência direta no comportamento mecânico das argamassas de revestimento.

A massa específica real foi encontrada no resíduo de cerâmica vermelha, pela NM 23 (2000).

2. 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. Este 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 ensaio é realizado em uma suspensão de 2g de CaO puro proveniente da calcinação do $CaCO_3$, 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 fenoftaleína (1g/L).

O resultado é expresso em quantidade de óxido de cálcio fixado por grama de pozolana, sendo determinado para os resíduos de cerâmica vermelha sintetizada em torno de 750 ºC. Estima-se a quantidade de CaO, que foi combinada com a pozolana, pela Equação 1.

$$mg\ CaO/_{g\ de\ material} = \frac{28\cdot(V_3\cdot m_3 - V_2\cdot m_4)}{m_4\cdot m_3\cdot m_2} \times Fc \qquad (1)$$

Onde:

m_2 – massa de material pozolânico;

m_3 – massa de CaO empregado no ensaio com a amostra;

m_4 – massa de CaO empregado no ensaio branco;

V_2 – volume de HCl 0,1 N consumido no ensaio com uma amostra em ml;

V_3 – volume de HCl 0,1 N consumido no ensaio branco;

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

5.1.2 Cimento Portland

Utilizou-se o cimento CPII Z-32, da marca Nassau, disponível comercialmente no mercado local. No laboratório, o mesmo foi acondicionado em sacos plásticos devidamente lacrados visando a manutenção das suas propriedades até o momento de sua utilização.

Mesmo sendo um cimento com teor de adição de pozolana, o mesmo não interferirá no resultado dos experimentos, já que os ensaios serão realizados a baixas idades(14 e 28 dias) e o efeito pozolânico se evidencia em idades mais elevadas (56 e 90 dias).

As características físicas e químicas fornecida pela empresa Nassau encontram-se expostas nas Tabela 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 - Caracterização química do cimento

Caracterização Química	**Resultado (%)**
Perda ao fogo	5,33
Resíduo insolúvel	11,06
SiO_2	22,79
Al_2O_3	4,73
Fe_2O_3	2,37
CaO	54,09
MgO	4,51
SO_3	3,65
Na_2O	0,14
K_2O	1,58

Fonte: Boletim técnico fornecido pela empresa cimentos Nassau, (2013).

Tabela 7 - Caracterização física do cimento

Caracterização Física	**Unidade**	**Resultado(%)**
Massa específica	g cm^3/	3,01
Área específica	m^2/Kg	418,00
Consistência normal	%	28,3
Início de pega	horas	4,15
Fim de pega	horas	5,20
Resistência compressão 1dia	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, (2013).

A massa unitária foi caracterizada em laboratório conforme a NBR 7251.

5.1.3 Cal Hidratada

Na composição das argamassas foi utilizada a cal hidratada CH-II, da marca MegaO, fabricante Sibelco. As Tabelas 8 e 9 expõem as análises química e física, respectivamente, fornecidas em boletim técnico pela empresa Sibelco.

Tabela 8 - Análise química da cal hidratada.

Caracterização Química	Resultado (%)
Perda ao fogo (1.000 °C)	21,05
Resíduo insolúvel	2,96
Umidade	1,06
H_2O combinada	19,12
Al_2O_3	0,06
Fe_2O_3	0,05
CaO	48,79
MgO	26,14
SO_3	0,08
CO_2	3,98
Óxidos não hidratados	14,12

Fonte: Boletim Técnico fornecido pela empresa Sibelco, (2013).

Tabela 9 - 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 Sibelco, (2013).

A massa unitária foi caracterizada em laboratório conforme a NBR 7251.

5.1.4 Agregado Miúdo (areia)

A areia utilizada 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 lavado, posteriormente seco em estufa a 100 °C por 24 horas.

Depois foi feito o ensaio de granulometria da areia, através da série normal de peneiras e de um peneiramento eletromecânico. A caracterização da areia foi feita para sua

padronização, seguindo a definição para agregado da NBR NM 52 (2009). A massa unitária foi caracterizada em laboratório pela NBR 7251.

O aspecto do peneirador e a divisão do material retido nas peneiras após o ensaio encontram-se expostos nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 - Peneirado eletromecânico.

Fonte: Do autor, (2013).

Figura 8 - Material retido em cada peneira

Fonte: Do autor, (2013).

5.1.5 Água

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

5.2 Produção das Argamassas

5.2.1 Desenvolvimento das Formulações

As argamassas de revestimento são geralmente dosadas em obras com traço de composição volumétrica 1:2:9 (cimento: cal: agregado), e cujas características, em várias idades (14, 28, 56 e 90 dias). Foram comparadas com as argamassas adicionadas com o rejeito cerâmico.

Para facilitar o trabalho laboratorial, este traço foi convertido em massa através do seguinte procedimento:

Para poder transformar esse traço em massa, tem que multiplicar o traço em volume pelas respectivas massas específicas aparentes. A massa unitária que foi caracterizada em laboratório pela NBR 7251 encontra-se exposto na Tabela 10.

Tabela 10 - Massa unitária do cimento, cal e areia (g/cm³).

Cimento	Cal	Areia
1,45	0,58	1,50

Fonte: Do autor, (2013).

Logo: 1*1,45: 2*0,58: 9*1,50 = 1,45: 1,16: 13,50

- Para ter o traço unitário em massa e só dividir todos pela massa especifica aparente do cimento que é 1,45, assim temos:

Traço unitário em massa **1: 0,8: 9,31: X**

$M_{cimento}$= 225g M_{cal}= 180g M_{areia}= 2095g

Onde:

X= fator de água cimento

$M_{cimento}$ = Massa de cimento

M_{cal} = Massa da cal

M_{areia} = Massa de areia

Foi deixado 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 de referência (0% de substituição) segundo a NBR 13276 (2005) de (260±5 mm) (SILVA, 2006).

5.2.2 Preparo das Argamassas

Primeiramente, realizou-se a mistura anidra do material em quantidades definidas a partir do traço e do teor de substituição, como indica a NBR 13276 (2002) para produção de argamassas mistas com cal. Para isso ser feito o processo de maturação: a areia, a cal hidratada e a água, foram devidamente misturadas por quatro minutos em uma argamassadeira eletromecânic,a de eixo vertical com volume de 5 litros na velocidade baixa, para em seguida permanecer em repouso por mais ou menos 24 horas como a norma especifica, em recipiente fechado para evitar a evaporação da água de amassamento.

Após esse tempo, então, o cimento e o resíduo foram adicionados a mistura maturada para serem misturados por mais 4 minutos. A Figura 9 indica a argamassadeira utilizada na produção das argamassas.

Figura 9 - Argamassadeira eletromecânica de eixo vertical de 5 litros.

Fonte: Do autor, (2013).

5.2.3 Moldagem dos Corpos de Prova

Os corpos de provas foram moldados seguindo as recomendação da NBR 13279 (2005) em moldes prismáticos 4 x 4 x 16 cm. A Figura 10 indica as argamassas nos moldes prismáticos ao ar livre.

- A argamassa foi preparada como descrito na seção 5.2.2.
- Em seguida foi colocada no molde em duas camada onde cada camada recebeu 30 golpes com o auxilio da mesa de adensamento (*flow table*).
- Depois de preenchido o molde foi rasado com auxilio de régua metálica e deixado ao ar livre por 24 horas para em seguida fazer a sua desforma.

Figura 10 - Argamassas nos moldes ao ar livre.

Fonte: Foto do autor, 2013.

Depois de desmoldados os corpos de prova, os mesmos foram curados ao ar, como preconiza a NBR 13276 (2002) para argamassas mistas com cal até a data dos ensaios de interesse.

Foram moldados 45 corpos de prova para cada idade, visando a execução de ensaios de resistência no estado endurecido.

5.3 Avaliação das Propriedades no Estado Fresco

Neste trabalho, as propriedades das argamassas referentes ao estado fresco analisadas foram:

- Consistência;
- Retenção de água;
- Densidade de massa;

5.3.1 Índice de Consistência

A consistência é uma das mais importantes propriedades das argamassas no estado fresco. Para este ensaio, a medida obtida relaciona-se com a viscosidade e não com a tensão de escoamento como o reometro, porque ao aplicar os golpes, a amostra é submetida a uma tensão que é maior que a tensão de escoamento. Entretanto, esta afirmação deve ser encarada com certa cautela, uma vez que o ensaio não permite uma avaliação do material em função do tempo o que seria necessário para uma possível correlação com a viscosidade.

O ensaio foi realizado conforme a NBR 13726 (2005). Os equipamentos utilizados foram: mesa para determinação de consistência (*Flow Table*), molde de tronco cônico, soquete metálico e um paquímetro digital. A seguir estão descritas as etapas do ensaio de consistência:

- A mesa e o molde receberam uma fina camada de óleo;
- A argamassa foi preparada como descrito em 5.2.2;
- O molde foi colocado sobre a mesa e preenchido com a argamassa em três camadas de alturas aproximadamente iguais.
- Na 1ª camada foram dados 15 golpes com o soquete metálico.
- Na 2ª camada foram dados 10 golpes com o soquete metálico.
- Na 3ª camada foram dados 05 golpes com o soquete metálico.
- Em seguida a argamassa foi rasada com o auxílio de uma régua metálica para retirada do excesso;
- Foi retirado o molde tronco-cônico;
- Após a retirada do molde foram aplicadas 30 quedas em aproximadamente 30 segundo com o auxilio da mesa de consistência.
- Logo após a última queda foram realizadas três medidas do espalhamento da argamassa.

O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de três diâmetros ortogonais. A Figura 11 indica a medição do espalhamento da argamassa.

Figura 11 - Medição do espalhamento da argamassa.

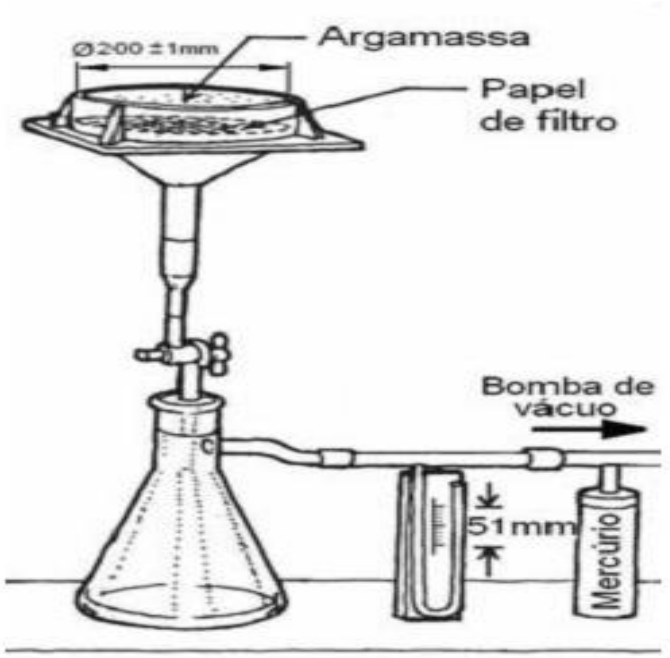
Fonte: Do autor, (2013).

5.3.2 Retenção de Água

A retenção de água das argamassas foi medida conforme a NBR 13277 (2005). Os equipamentos utilizados foram: funil de Buchner, prato, papel filtro, bomba de vácuo, balança. A Figura 12 indica o funil de Büchner modificado. As seguintes etapas foram executadas para o ensaio de retenção de água:

- A argamassa foi preparada como descrito em 5.2.2.
- O funil de Buchner foi montado com o prato e o papel filtro umedecido, aplicado uma sucção de 51 mm de mercúrio por 90 segundos, para retirar o excesso de água. Logo após o conjunto foi pesado;
- Na sequência, o prato foi preenchido com argamassa até que a argamassa passasse um pouco acima da borda do prato. A argamassa foi adensada com 37 golpes de soquete metálicos, sendo 16 golpes aplicados uniformemente junto às bordas e 21 golpes aplicados uniformemente distribuídos na parte central da amostra. A argamassa foi rasada com o auxílio de uma régua metálica e depois novamente pesado o conjunto;
- Em seguida, o conjunto foi montado e aplicado uma sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos para em seguida ser pesado novamente.

Figura 12 - Esquema do funil de Büchner modificado.



Fonte: Carasek, (2007).

Segundo a NBR 13277 (2005), o cálculo da retenção de água é dado pela equação 2.

$$Ra = \left[1 - \frac{(ma - ms)}{AF \times (ma - mv)}\right] \times 100 \quad (2)$$

Onde:

AF: fator de água da argamassa fresca;

$$AF = \frac{mw}{m + mw}$$

ma = massa do conjunto com argamassa (g);

ms = massa do conjunto após a sucção (g);

mw =massa total de acrescentada a mistura (g);

m = soma das massas dos componentes anidros (g);

5.3.3 Determinação da Densidade de Massa

Os ensaios para determinação da densidade de massa foram realizados seguindo as instruções da NBR 13278 (2005). O ensaio foi divido em três etapas: calibração do recipiente cilíndrico, preparação da argamassa e colocação da argamassa no recipiente.

- Calibração do recipiente: foi escolhido um recipiente cilíndrico e pesado vazio com placa de vidro, em seguida o recipiente foi cheio com água destilada, para ser pesado desta vez com água.
- Cálculo do volume foi realizado através da equação 3.

$$Vr = (ma - mv) \quad (3)$$

Onde:

Vr é a volume do recipiente;

ma é a massa do recipiente com água e placa de vidro;

mv é a massa do recipiente com a placa.

- Preparo da argamassa: a argamassa foi preparada conforme visto no item 5.2.2.
- Colocação da argamassa no recipiente: o recipiente foi cheio com argamassa, imediatamente após a mistura, em três camadas com alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi adensada com 20 golpes com uma espátula, de uma forma que os golpes nas camadas correspondentes. Em seguida, foram efetuadas três quedas a uma altura de aproximadamente 3 cm para eliminar os vazios. O recipiente foi rasado e pesado, a fim de registrar sua massa (mc).

A densidade de massa, em kg/m³, foi calculada através da fórmula expressa na Equação 4.

$$d = \frac{(mc - mv) \times 1000}{Vr} \quad (4)$$

Onde:

d = densidade de massa da argamassa (kg/m³);

mc = massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio (g);

mv = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

Vr = volume do recipiente (cm³).

5.4 Avaliação no Estado Endurecido

Neste trabalho, as propriedades das argamassas referentes ao estado endurecido analisadas foram:

- Densidade de massa;
- Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade;
- Resistência à compressão e a tração na flexão;

5.4.1 Massa Aparente

A massa aparente foi determinada com base na metodologia descrita na NBR 13280 (2005). Foram moldados e curados ao ar, até o momento do ensaio, 3 corpos de prova prismáticos, medindo 4 cm x 4 cm x 16 cm, tanto para a argamassa de referência quanto para cada argamassa contendo as substituições do cimento pelo resíduo cerâmico. Procedimentos de execução do ensaio:

- Foram utilizados 3 corpos de prova moldados conforme já mencionado;
- Cura dos corpos de prova aos 28 dias;
- Com o auxílio de um paquímetro, foi determinada a altura, largura e comprimento de cada corpo de prova, para o cálculo do volume;
- Em seguida, os corpos de prova foram pesados;
- Com o volume e a massa foi determinada a densidade de massa no estado endurecido.

A massa aparente foi calculada através da equação 5:

$$\rho = \frac{(M)\times 1000}{V} \tag{5}$$

Onde:
ρ = massa específica expressa em kg/m³;
V = volume do corpo de prova em cm³;
M = massa do corpo de prova em g;

5.4.2 Absorção de Água por Capilaridade

As medidas de absorção de água por capilaridade foram realizadas seguindo as instruções da NBR15259 (2005). Tal ensaio foi realizado com três corpos de prova, considerando cada tipo específico de argamassa como indica a Figura 13. O ensaio tem as seguintes etapas:

- Os corpos de prova foram marcados, três para cada tipo de argamassa;

- Em seguida, tiveram uma de suas faces lixadas e posteriomente limpas com o auxílio de um pincel;
- Tais corpos de prova foram pesados para obtenção da massa inicial;
- Os corpos de prova foram colocados dentro de um recipiente com água em uma altura de (5+-1) mm;
- Após os 10 minutos e os 90 minutos, os corpos de prova foram pesados e foram registradas a sua massa, M10 e M90, respectivamente.

Figura 13 - Corpos-de-prova durante o ensaio.

Fonte: Do autor, (2013).

Para o cálculo da absorção de água por capilaridade foi utilizado a equação 6:

$$At = \frac{(Mt - Mo)}{16} \quad (6)$$

Onde:

At = Absorção de água por capilaridade (g/cm³);

Mt = Massa do corpo de prova a cada tempo (g);

M0 = Massa inicial do corpo de prova (g);

16 = Área de corpo de prova avaliado (cm²);

O coeficiente de capilaridade foi calculado através da equação 7:

$$C = (M90 - M10) \quad (7)$$

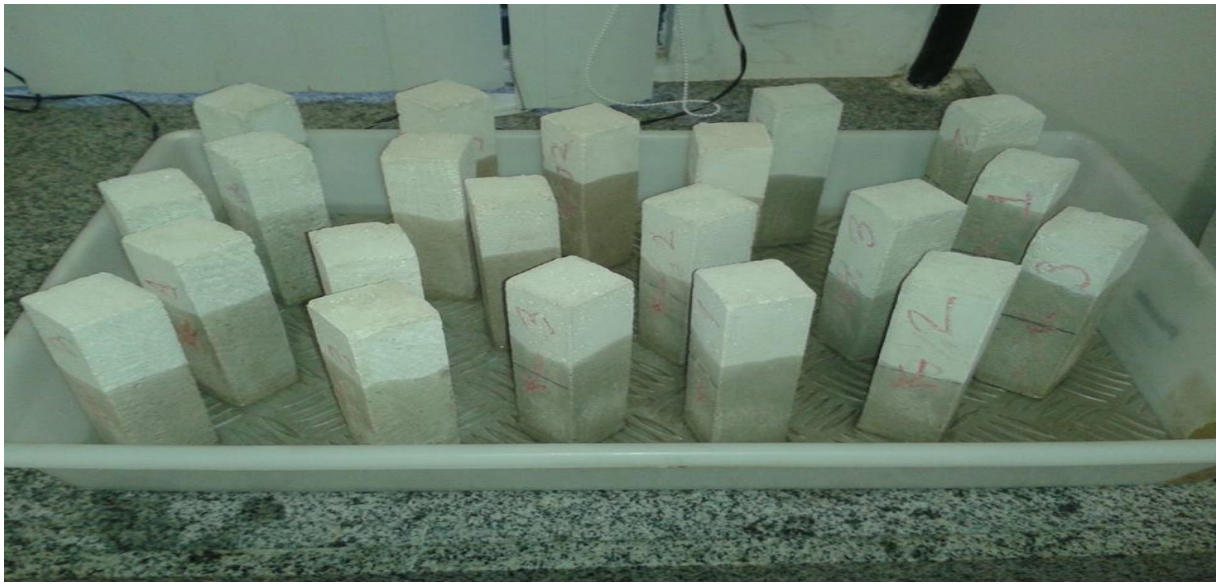
Onde:

M90 = Massa do corpo de prova após 90 min (g);

M10 = Massa do corpo de prova após 10 min (g);

A Figura 14 indica a imagem dos corpos-de-prova no final do ensaio.

Figura 14- Corpos-de-prova no final do ensaio.

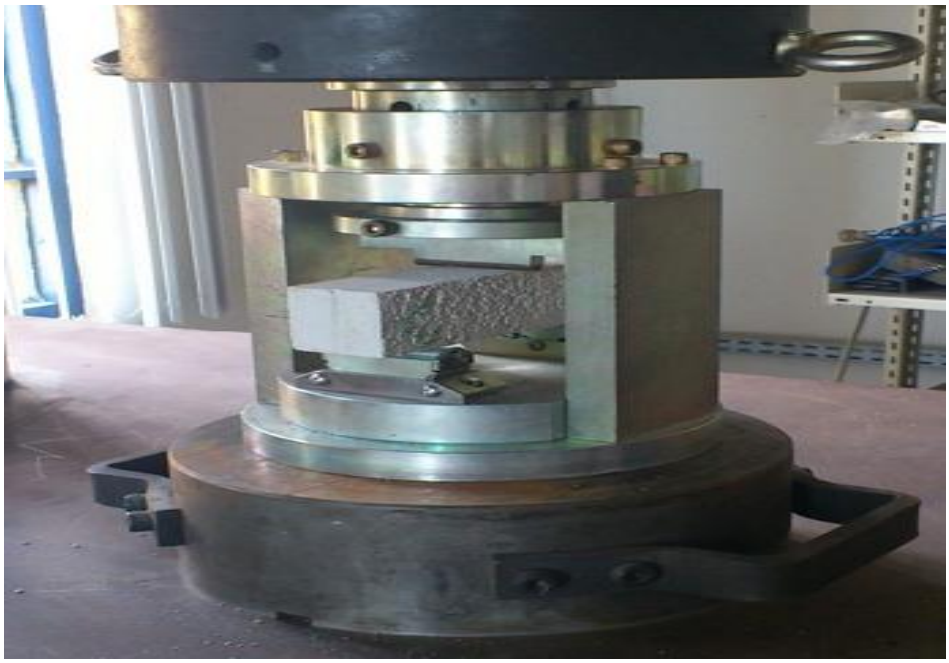


Fonte: Do autor, (2013).

5.4.3 Resistência à Compressão e à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova prismáticos foi feito pela NBR 13279. Foram confeccionados 06 corpos-de-prova para cada mistura avaliada, em quatro idades. Foi utilizado o dispositivo acoplado a prensa, de modelo Shimadzu UH 2000 kN como indica a Figura 15, utilizando a escala de 40 kN. A carga aplicada foi de 500 N/s até que ocorresse a ruptura.

Figura 15 - Ensaio de flexão bi-apoiado.



Fonte: Silva, Bruno de Melo (2012).

Após o ensaio cada corpo de prova foi dividido em duas metades, essas metades foram posicionadas na prensa para o ensaio a compressão como mostrado na Figura 16. Sendo um total de 120 amostras.

Figura 16 - Corpo de prova após ensaio de tração na flexão.

Fonte: Silva, Bruno de Melo (2012).

A Figura 17 ilustra o ensaio de resistência a compressão. A Figura 18 indica a ruptura do corpo de prova após ensaio de compressão.

Figura 17 - Ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Silva, Bruno de Melo (2012).

Figura 18 - Corpo de prova após ensaio de compressão.

Fonte: Silva, Bruno de Melo (2012).

6 Resultados e Discussões

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelos experimentos realizados com a presente pesquisa.

6.1 Obtenção do Resíduo Cerâmico Via Indústria

O aspecto do resíduo de cerâmica vermelha, após moagem (direita) e peneiramento (esquerda) encontra-se exposto na Figura 19.

Figura 19 - Imagem do resíduo moído e peneirado (esquerda) e resíduo apenas moído (direita).

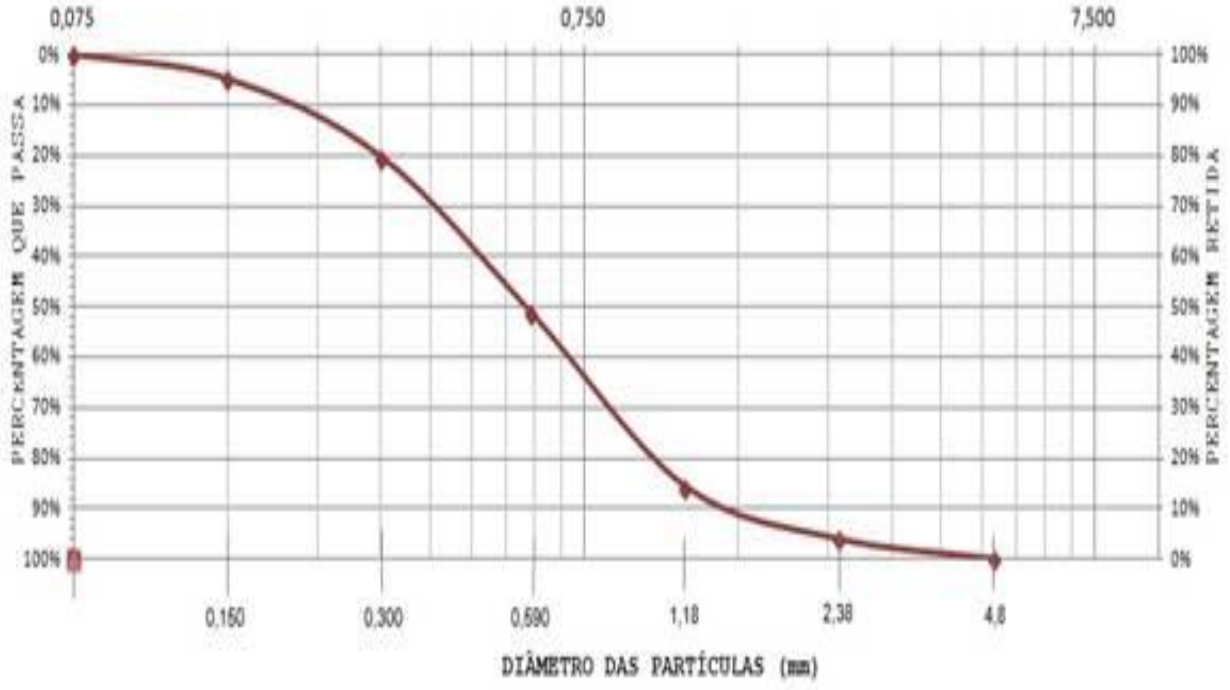
Fonte: Do autor, (2013).

A massa específica real encontrada no resíduo de cerâmica vermelha, pela NM 23:2000, foi de 2,57 g/cm³.

6.2 Caracterização dos Materiais de Partida

A areia foi lavada em betoneira, seca em estufa e classificada granulométricamente. Após o ensaio de granulometria, foi classificada como uma areia média, bem graduada e uniforme. A curva granulométrica da areia utilizada no presente trabalho está indicada na Figura 20.

Figura 20 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Do autor, (2013).

6.3 Verificação da Atividade Pozolânica do Resíduo de Cerâmica Vermelha.

De acordo com a literatura, a cerâmica vermelha apresenta tipicamente valores de pozolanicidade de Chapelle que vão de 533 a 795 mg CaO/g. Embora, pelo método de Chapelle, o material para ser considerado efetivamente pozolânico deve apresentar um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g da amostra (CHRISTÓFOLLI, 2010).

Os consumos de CaO para as amostras de resíduo queimadas a 850 ºC e 950 ºC estão indicados na Tabela 11.

Tabela 11 - Consumos de CaO das amostras de resíduo.

Amostras (mg/g)	
850 °C	950 °C
311	296

Fonte: Do autor, (2013).

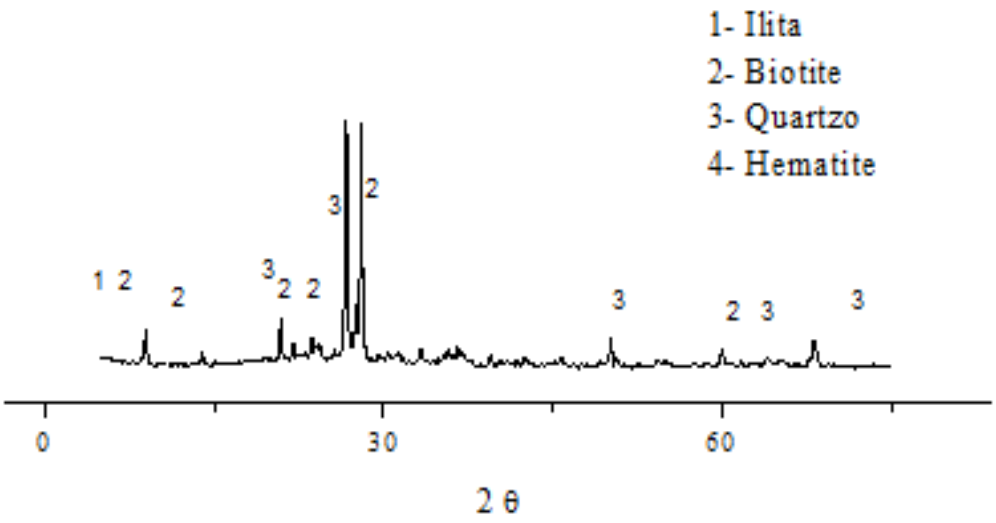
Os resultados indicam que na amostra de resíduo queimada a 850 ºC fixa-se mais cálcio. Esse fenômeno pode ser um indicativo de que as argilas são de base caulinítica, em que compostos reativos são formados a temperaturas mais baixas. Por outro lado, destaca-se que

ambas as amostras, tanto a sintetizada a 850 ºC, quanto a 950 ºC, foram capazes de fixar cálcio próximos a 330 mg CaO/mg de amostra que é o consumo mínimo de CaO, segundo Christófolli (2010) para cerâmicas vermelhas pozolânicas.

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

No entanto, a análise por difração de raios-X do resíduo cerâmico estudado nesse trabalho, cujo difratograma está exposto na Figura 21, indica a presença de picos representativos de minerais cristalinos como quartzo, biotite e ilita, que são pouco ou não reativos na reação pozolânica, conforme destacado no trabalho de Montanheiro (2011). Essa pode ser a explicação para a amostra não ter atingido o consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de amostra a fim de ser classificada como pozolânica.

Figura 21 - Difratograma para o resíduo de cerâmica vermelha em estudo.



Fonte: Do autor, (2013).

6.4 Definição do Traço da Argamassa

O traço definido para realização da pesquisa foi um traço rico em cimento, cujo traço foi 1:2:9 (cimento, cal hidratada e areia), medidos em volume. Para desenvolver a pesquisa, tal traço foi convertido para massa. O traço em volume e sua conversão de volume para massa, que já foi explicado, como indicado na Tabela 12.

Tabela 12 - Conversão do traço em volume para o traço em massa.

Material	Traço em Volume	Traço em Massa
Cimento	1	1
Cal	2	0,8
Areia	9	9,31

Fonte: Do autor, (2013).

O fator água-cimento da argamassa constante frente às substituições suficiente para atingir a consistência normal da argamassa de referência (0% de substituição) segundo a NBR 13276 (2005) de (260±5 mm), foi encontrado depois de inúmeras tentativas, até obter o valor de 523 ml que atende as solicitações.

De acordo com o traço encontrado a quantidade de materiais segundo as substituições e levando em conta que a NBR 13276 recomenda para a preparação de argamassas frescas usar para a mistura 2,5 kg de material seco com aproximação de 1,0 g. Os respectivos valores estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Quantitativos de materiais utilizados nas formulações.

Substituição	Cimento(g)	Cal(g)	Areia(g)	Resíduo	Água(ml)
0	225,00	180	2095	0	523
2,5	219,37	180	2095	5,62	523
5	213,75	180	2095	11,25	523
7,5	208,12	180	2095	16,88	523
10	202,5	180	2095	22,50	523

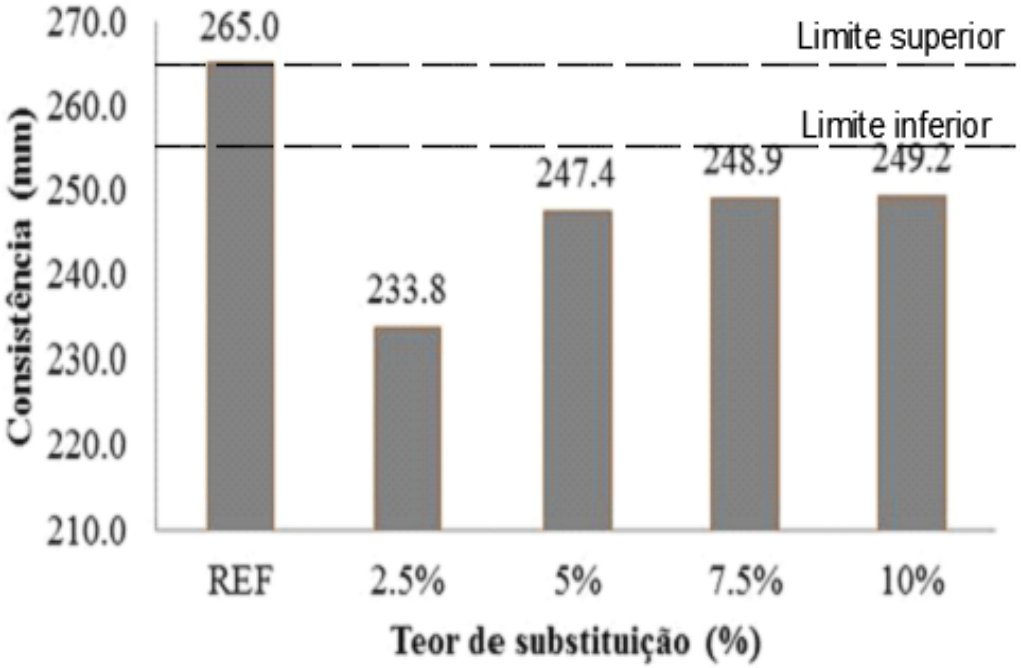
Fonte: Do autor, (2013).

6.5 Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

6.5.1 Índice de Consistência

Os valores do índice de consistência da argamassa padrão e das substituídas por resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% estão indicados na Figura 22.

Figura 22 - Gráfico da consistência normal consistência da argamassa padrão e das substituídas por resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%.



Fonte: Do autor, (2013).

Observa-se que, de uma forma geral, houve perda de consistência quando da substituição do cimento pelo resíduo de cerâmica vermelha.

Incialmente, a perda de consistência foi maior, uma vez que o fenômeno foi regido pela absorção de água por parte das partículas de cerâmica vermelha que possuem alta área superficial. Ao aumentar a quantidade de resíduo que está sendo incorporado, há um outro efeito secundário que predomina, o efeito de escorregamento. Devido às partículas de cerâmica vermelha moídas e peneiradas apresentarem morfologia arredondada, este fato favorece o escorregamento e deslizamento da massa de argamassa quando do ensaio de consistência pela mesa de *flow-table*.

Vale destacar que todas as substituições indicaram perda de consistência, deixando as misturas fora do padrão 260 ± 5mm, ou seja, abaixo de 255mm. No entanto, as misturas foram possíveis de serem moldadas e foi optado por manter a relação água-cimento constante, a fim de verificar a influência das substituições de cimento por resíduo em termos de propriedades mecânicas e microestruturais.

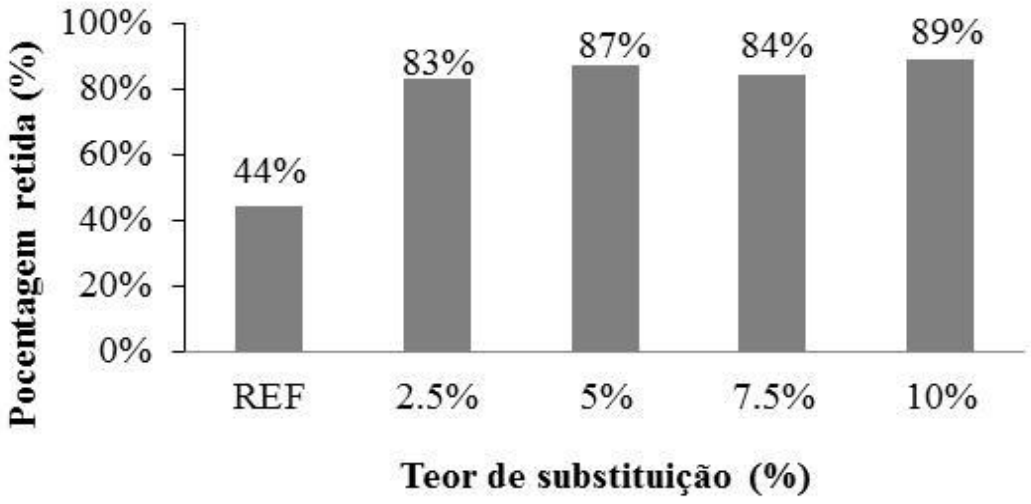
A substituição de cimento por resíduo de cerâmica vermelha de até 10% em relação à massa de cimento não foi tão vantajosa em termos de consistência, pois a argamassa ficou fora do padrão proposto pela norma de 260 ± 5mm.

Entretando, foi totalmente possível de ser moldada. Vale destacar que há no mercado da construção civil uma série de aditivos plastificantes e superplastificantes que promovem o aumento da trabalhabilidade do sistema.

6.5.2 Retenção de Água

Os resultados para a argamassa padrão e das substituídas por resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% encontram-se expostos na Figura 23. Verifica-se que a retenção de água praticamente dobrou com a adição dos resíduos. Não houve, no entanto, influência nesse parâmetro quando ao aumento da adição de 2,5% até 10%. Isso pode ser considerado de pequena relevância, pois segundo a NBR 13281 (2005) ambas as argamassas analisadas com resíduo foram classificadas na mesma classe, U3, como indica na Tabela 14.

Figura 23 - Gráfico da retenção de água da argamassa padrão e das substituídas por resíduo de cerâmica vermelha nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%.



Fonte: Do autor, (2013).

Tabela 14 - Classificação da retenção de água segundo a NBR 13281.

Classe	Retenção de água %	Tipo de argamassa
U1	< 78	Referência
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	2,5 % á 10 %
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: Do autor, (2013).

O aumento da retenção de água está relacionado com a alta área superficial específica do resíduo dada sua finura após peneiramento, fazendo com que ajude a "segurar" a água, quando da submissão da argamassa no estado fresco ao vácuo.

Segundo Sabattini (1986 apud Melo, 2012) aumenta-se a retenção de água de uma argamassa, quando se aumenta a superfície específica dos constituintes ou se utiliza aditivos que por suas características absorvam ou impeçam a percolação de água.

Esse aumento é benéfico, pois quanto maior a retenção de água na pasta, mais favorável será para as reações de endurecimento, hidratação adequada, melhorando assim a aderência, durabilidade, estanqueidade e resistência mecânica.

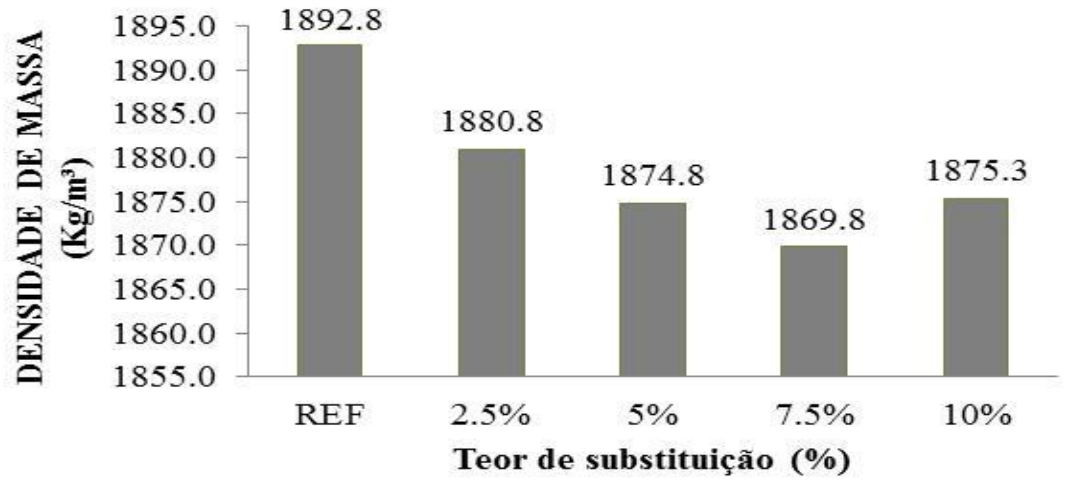
Salienta-se que esse comportamento é extremamente positivo em termos da aplicação prática da argamassa, pois ajuda a manter a água durante a execução do revestimento, fazendo com que seja menos perdida para o tijolo cerâmico ou evaporada, evitando trincas e retração.

Desta forma a substituição de cimento por resíduo de cerâmica vermelha de até 10% em relação à massa de cimento foi positiva em termos de densidade de retenção de água.

6.5.3 Densidade de Massa no Estado Fresco

Os valores obtidos através do ensaio de densidade de massa para as argamassas de referência e para as argamassas com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha estão indicados na Figura 24.

Figura 24 - Gráfico de densidade de massa para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Do autor, (2013).

Houve uma redução de 0,65% quando da substituição de 2,5% de cimento por resíduos, de 0,95% para a substituição de 5%, de 1,22% para 7,5% de substituição e, por fim, 0,92% para a substituição de 10% de cimento por resíduos de cerâmica vermelha. Salienta-se que esse comportamento é vantajoso do ponto de vista de aplicação no canteiro de obras, pois quanto mais leve for a argamassa, mais fácil para o pedreiro efetuar a mistura na argamassadeira manual e lançá-la na parede.

Em função dos resultados serem muito semelhantes entre si, de acordo com a NBR 13281 (2005) ambas as argamassas podem ser classificadas em uma mesma classe D5, como está indicado na Tabela 15.

Tabela 15 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado fresco segundo NBR 13281.

Classe	**Densidade de Massa no estado fresco (kg/m³)**	**Tipo de argamassa**
D1	≤ 1400	
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	2,5 % a 10 % e Referência
D6	>2000	

Fonte: Do autor, (2013).

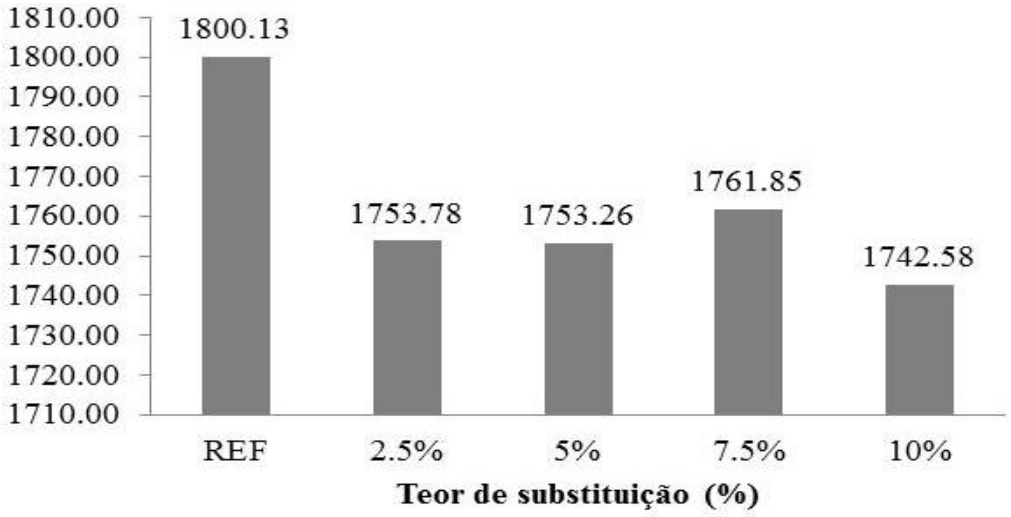
A substituição de cimento por resíduo de cerâmica vermelha de até 10% em relação à massa de cimento apresentou vantagem em termos de densidade de massa no estado fresco.

6.6 Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido

6.6.1 Massa Aparente

O gráfico exposto na Figura 25 apresenta os resultados de massa aparente para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.

Figura 25 - Gráfico de densidade de massa aparente para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Do autor, (2013).

Verifica-se que a substituição do cimento por resíduos de cerâmica vermelha nas porcentagens de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% proporcionou reduções em torno de 2,5 a 3% no parâmetro de massa aparente no estado endurecido. Esse comportamento é positivo do ponto de vista estrutural, pois estará proporcionando revestimentos argamassados mais leves e, consequentemente, menos peso para dimensionamento das fundações.

A argamassa de referência e a argamassa com substituição do cimento por resíduo pode ser classificado como uma argamassa do tipo M5 segundo a NBR 13281 (2005), conforme pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 - Classificação das argamassas segundo a densidade de massa no estado endurecido NBR 13281 (2005).

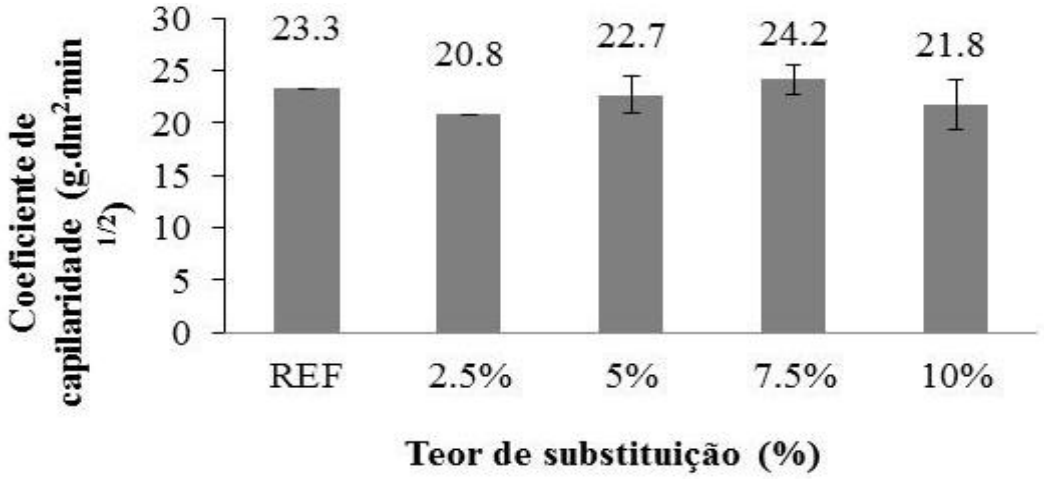
Classe	**Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)**	**Tipo de argamassa**
M1	< 1200	
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	2,5 % a 10 % e Referência
M6	> 2000	

Fonte: Do autor, (2013).

6.6.2 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

Os resultados comparativos em termos de coeficiente de capilaridade podem ser vistos na Figura 26, acompanhado da barra de erro baseada no desvio-padrão, sendo dada pela diferença entre a massa dos corpos após 90 minutos de imersão em água e a massa após 10 minutos.

Figura 26 - Coeficiente de capilaridade para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Do autor, (2013).

Verifica-se que dentro do desvio-padrão não houve mudança significativa no coeficiente de capilaridade, o que mostra que a substituição parcial do cimento pelo resíduo não afetou a absorção de água por capilaridade, o que é um aspecto positivo.

Com base nos valores apresentados na Figura 26, podem-se qualificar todas as argamassas como sendo do tipo C6, de acordo com a NBR 13281 (2005), cujos intervalos encontram-se expostos na Tabela 17.

Tabela 17 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de capilaridade - NBR 13281 (2005).

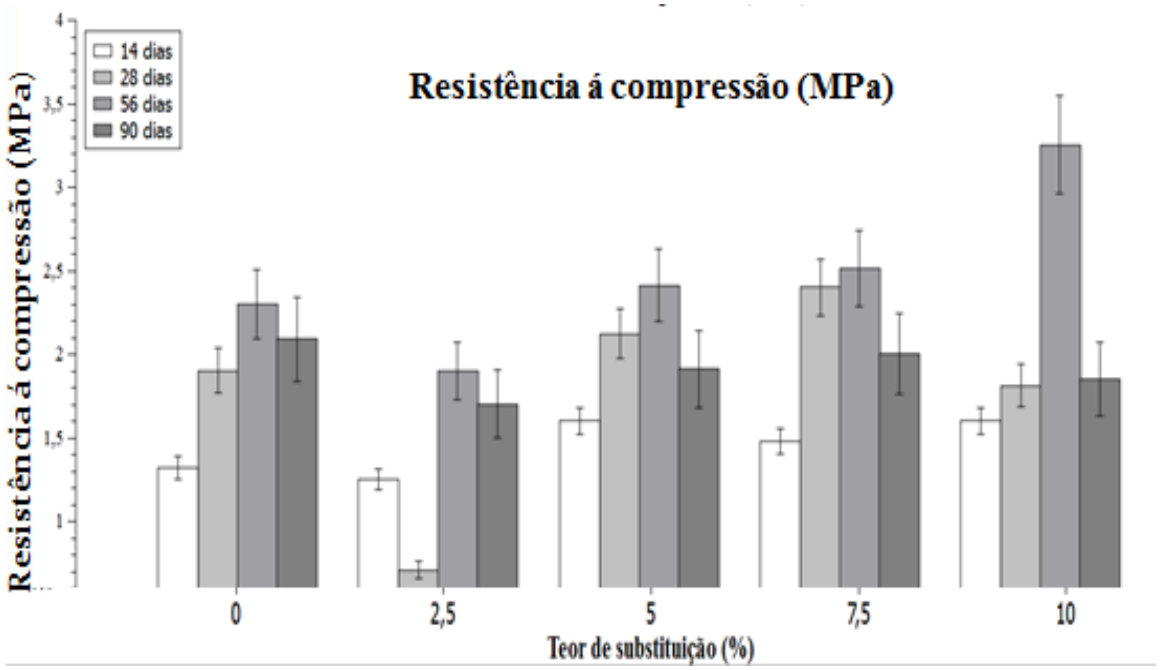
Classe	Coeficiente de capilaridade g/dm².min1/2	Tipo de argamassa
C1	≤ 1,5	
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	> 10,0	2,5 % a 10 % e Referência

Fonte: Do autor, (2013).

6.6.3 Resistência à Compressão

O gráfico exposto na Figura 27 representa os resultados dos ensaios de compressão, para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.

Figura 27 - Gráfico de resistência a compressão para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Do autor, (2013).

Verifica-se que, quanto à resistência à compressão, como esperado, as resistências à compressão aos 56 dias e 90 dias realmente não demonstraram o efeito da atividade pozolânica, conforme DRX e ensaios de Chapelle.

No entanto, de uma forma geral, após verificada a média dos valores referentes ao rompimento de seis corpos-de-prova, houve uma manutenção nas resistências à compressão dos sistemas após a substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica vermelha moída e peneirada. Acredita-se que esse fenômeno deveu-se ao efeito *filler* de preenchimento dos vazios pelo resíduo, que, foi peneirado na peneira de 75 µm, dimensão considerada na literatura vigente para proporcionar esse efeito.

Verifica-se que dentro do desvio-padrão não houve mudança significativa na resistência à compressão, o que mostra que a substituição parcial do cimento pelo resíduo não afetou esse parâmetro, o que é positivo.

Com base nos valores apresentados na Figura 27, pode-se classificar as argamassas de acordo com a NBR 13281 (2005), cujos intervalos encontram-se expostos na Tabela 18 pra a idade de 14 dias, já as Tabelas 19, 20 e 21 para as idades de 28,56 e 90 dias respectivamente.

Tabela 18 - Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 14 dias segundo a NBR 13281 (2005).

Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Tipo de argamassa
P1	≤ 2	2,5%, 7,5% e 0%
P2	1,5 a 3,0	5% e 10%
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8	

Fonte: Do autor, (2013).

Tabela 19 - Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 28 dias segundo a NBR 13281 (2005).

Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Tipo de argamassa
P1	≤ 2	
P2	1,5 a 3,0	0% a 10%
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8	

Fonte: Do autor, (2013).

Tabela 20 - Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 56 dias segundo a NBR 13281 (2005).

Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Tipo de argamassa
P1	≤ 2	
P2	1,5 a 3,0	0% a 5%
P3	2,5 a 4,5	7,5% e 10%
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8	

Fonte: Do autor, (2013).

Tabela 21 - Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão em 90 dias segundo a NBR 13281 (2005).

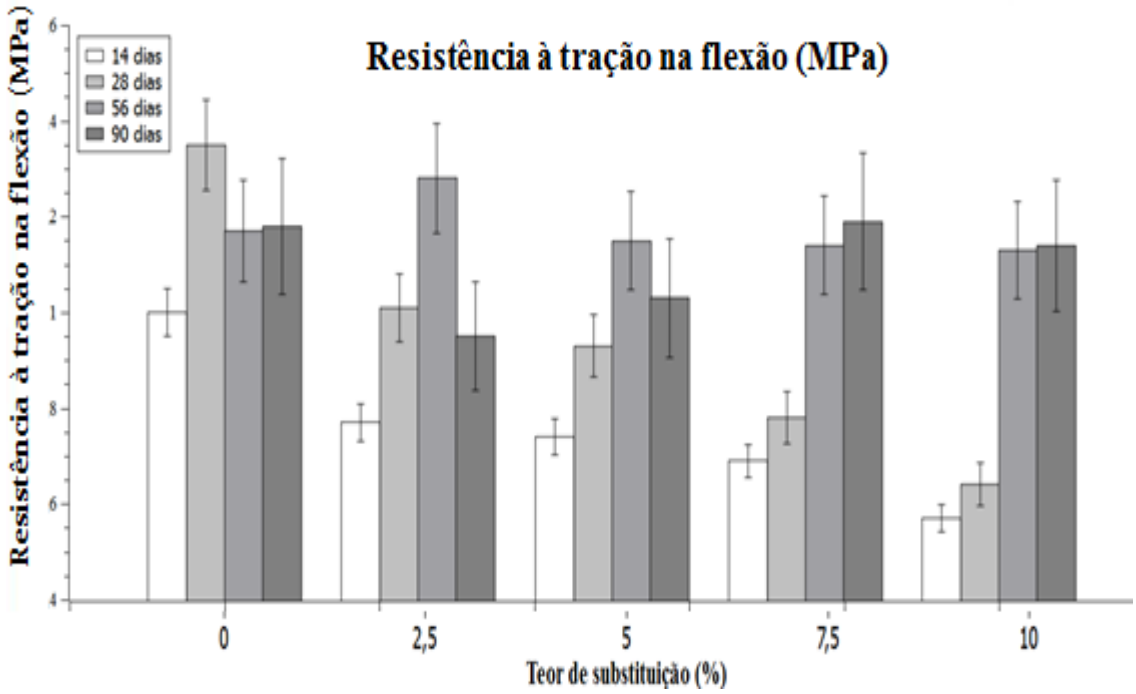
Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Tipo de argamassa
P1	≤ 2	
P2	1,5 a 3,0	0% a 10%
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8	

Fonte: Do autor, (2013).

6.6.4 Resistência à Flexão

O gráfico exposto na Figura 28 representa os resultados dos ensaios à flexão, para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.

Figura 28 - Gráfico de resistência à flexão para as argamassas de referência e com substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha.



Fonte: Do autor, (2013).

Verifica-se que a presença do resíduo cerâmico na argamassa em substituição parcial do cimento até 10% em relação à massa de cimento manteve os valores da resistência à flexão. O comportamento, principalmente para as substituições maiores foi melhor que o da amostra de referência, em função do efeito *filler* de preenchimento dos vazios do sistema.

Com base nos valores apresentados na Figura 28, podem-se classificar as argamassas de acordo com a NBR 13281 (2005), cujos intervalos encontram-se expostos na Tabela 22 pra a idade de 14 dias, já as Tabelas 23, 24 e 25 para as idades 28, 56 e 90 dias respectivamente.

Tabela 22 - Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 14 dias segundo a NBR 13281 (2005).

Classe	**Resistência à compressão (Mpa)**	**Tipo de argamassa**
R1	≤ 1,5	
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	0% a 10%

Fonte: Do autor, (2013).

Tabela 23 - Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 28 dias segundo a NBR 13281 (2005).

Classe	**Resistência à compressão (Mpa)**	**Tipo de argamassa**
R1	≤ 1,5	
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	0% a 10%

Fonte: Do autor, (2013).

Tabela 24 - Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 56 dias segundo a NBR 13281 (2005).

Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Tipo de argamassa
R1	≤ 1,5	
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	0% a 10%

Fonte: Do autor, (2013).

Tabela 25 - Classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão em 90 dias segundo a NBR 13281 (2005).

Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Tipo de argamassa
R1	≤ 1,5	
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	0% a 10%

Fonte: Do autor, (2013).

7 Considerações Finais

A substituição parcial do cimento nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo de cerâmica vermelha em relação à massa de cimento é viável tecnicamente tanto em termos de propriedades no estado fresco, quanto no estado endurecido.

Apesar do índice de atividade pozolânica por Chapelle ter indicado valores de consumo de CaO próximos a 330 mg de amostra/mg de CaO, resultados de difração de raios-X e resistências à compressão aos 56 e 90 dias, indicam que o resíduo ora em estudo não apresenta atividade pozolânica.

A dispersão dos valores tanto de resistência à compressão quanto a resistência a tração pode ser explicado por ser um valor relativamente baixo, o que favorece o aumento nas dispersões dos resultados, diferente do que ocorre no concreto, ou na argamassa em traço 1:3.

Apesar de haver perda na consistência do sistema, a argamassa pode ser moldada sem problemas durante o adensamento. A substituição de cimento por resíduo de cerâmica vermelha de até 10% em relação à massa de cimento foi positiva em termos de densidade de massa no estado fresco e endurecido e retenção de água. Desta forma, percebe-se que as propriedades mecânicas são em função do efeito *filler*.

A substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico nas argamassas manteve as ordens de classificação para aplicação das argamassas conforme a NBR 13281 (2005), na maioria das propriedades que é positivo de ser mantido. Vale destacar a retenção de água que melhorou sua ordem de classificação que é benéfico, mais favorável será para as reações de endurecimento, hidratação adequada, melhorando assim a aderência, durabilidade, estanqueidade e resistência mecânica.

8 Sugestão de Trabalhos Futuros

No decorrer dos estudos e com os resultados de alguns estudos, ficou evidenciado a importância de serem feitos mais alguns estudos, seguem algumas sugestões abaixo:

- Avaliação da aplicabilidade em campo;
- Realizar os mesmos estudos com teor maior de resíduo;
- Realizar ensaio de início e fim de pega para a argamassa de referência e modificada;
- Avaliar microestruturalmente os concretos endurecidos;
- Realizar os ensaios de aderência;
- Realizar estudo sobre adição do resíduo como agregado na melhor propoção encontrada nesse estudo;

Referências

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ALCÂNTARA, P.S.X. **Desenvolvimento de argamassas com adição de resíduo de cerâmica vermelha com base no seu potencial pozolânico e sua aplicação no cotidiano de obras.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil. Centro Acadêmico do Agreste – UFPE, 2013.

ALENCAR, R. S. **A influência da adição de pigmentos na resistência à compressão e durabilidade de concretos com cimento branco e cinza.** In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47º. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

ALVES, S. M. S. **Desenvolvimento de compósitos resistentes através da substituição parcial do cimento por resíduo da indústria cerâmica.** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2002. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. 64p.

ANGELIM, R.R.; ANGELIM, S.C.M. e CARASEK, H. 2003. **Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, V. São Paulo, USP/ANTAC, p. 141 -150.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: Informação e documento trabalhos acadêmicos - apresentação.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 13749: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1987.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 23: Cimento portland – Determinação de massa específica.** Rio de Janeiro, 2010.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528: revestimento de parede e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6474: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: cal hidratada para argamassas.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200: execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007: Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro,2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277: argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005.

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, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752. Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento**. Rio de Janeiro, 1992.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto de execução de revestimentos de argamassas**, 4ª edição, São Paulo: O nome da rosa, 2002.

BAUER E. **Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades**. SINDUSCON-DF, 2005.

CAMPITELI, V. C.; MASSARETTO, R.; RODRIGUES, P. T. **Dosagem experimental de argamassas mistas a partir de cal virgem moída.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I, 1995, Goiânia. Anais... Goiânia: ANTAC, 1995, p.73-82.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo, IBRACON, 2007.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV.. 2001, Brasilia. Anais... Brasilia: ANTAC, 2001. p. 43-67.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, VANDERLEY M. **A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa**. Ambiente Construído, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 37-44, julho/dezembro. 1997.

CARVALHO JR A. N. **Avaliação da Aderência dos Revestimentos Argamassados: Uma Contribuição à Identificação do Sistema de Aderência**. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

CAVALCANTE, R.J.; CHERIAF, M. **Ensaios de avaliação para controle de materiais com resíduos incorporados em 1996.** In: WORKSHOP RECICLAGEM E

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. Artigos técnicos... São Paulo: Epusp, 1996.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de Argilas Calcinadas para a Produção de Cimento Portland Pozolânico na Região de Curitiba** - Brasil. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Área de Concentração em Ambiente Construído, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

COELHO, F. C. A. **Variación del color y textura de hormigones vistos com adcion de pigmentos inorgânicos, sometidos a distintos estados de exposión ambiental.** Tese (Doutorado em Ingeniero de Caminos Canales y Puertos). Universidad Politécnica de Madrid, U. P. MADRID. Espanha. 2001.

CORDEIRO . **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios**. Quim. Nova, Vol. 32, No. 1, 82-86, 2009.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto**. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

COSTA, A. C. . **Propriedades mecânicas do concreto colorido de alta resistência**. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 46º. Florianópolis . Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução.** São Paulo: Pini, 1994.

FONSECA, A.D.P. **Estudo comparativos 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.

FREIRE, W. J; BERALDO, A. L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Ed. UNICAMP. Campinas, 2003.

GONÇALVES, J. P. G. **Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos.**2007.Disponívelem<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S037044672007000400009&script=sci_arttext> Acesso em: nov. de 2013.

GUIMARÃES, J. E. P. A cal – **fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

HENDGES . **Resistência à compressão, custo e coloração de concretos produzidos com pigmentos e cimentos Portland cinza e branco**. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 46º. Florianópolis. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004.

INVENTÁRIO, **Estadual de Resíduos Sólidos Industriais de Pernambuco**. PERNAMBUCO – RECIFE. CPRH/FNMA, 2003. 174p. Disponível em <http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/inventario>. Acesso em 14 de fevereiro 2011. LEA´S. Chemestry of Cement and Concrete, 4 edição. Editora Elsevier Science & Technology, 2004.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA M. G. **Cinzas e aglomerantes alternativos.** In: WESLEY JORGE FREIRE e ANTONIO LUDOVICO BERALDO. Tecnologias e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora UNICAMP, 2003, p. 145- 190.

LARA, D.; NASCIMENTO, O.; MACEDO, A.; GALLO, G.; PEREIRA, L.; POTY, E.. **Dosagem das argamassas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I., 1995, Goiânia. Anais... Goiânia: ANTAC, 1995. p. 63-72.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre, RS. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da UFRGS, 2001.

LOURENCI, S. **Caracterização de argamassas de revestimento fabricadas com materiais alternativos.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), 2003.

MACIEL, Luciana Leone. BARROS, Mércia M. S. Bottura. SABBATINI, Fernando Henrique. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externa e tetos**. São Paulo, 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais. 2 ed**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste Pernambucano. Pernambuco – Brasil**; (Dissertação). 2012, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Núcleo de Tecnologia , UFPE. Caruaru; Pernambuco, 2012.

MINASCAL – **Definição cal Hidratada**. Disponível em < http://www.minascal.com.br/> acessado em 10 de outubro de 2012.

MINERAIS DO PARANÁ S.A – MINEROPAR. **Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba.** Curitiba: MINEROPAR, 2004. 288 p.

MIRANDA, L. M. C. C.. **Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada**. 2009. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

NETTO, R. M. **Matériais Pozolânicos.** Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NÓBREGA, A. C. V.; MARTINELLI, A. E.; MELO, D. M. A.; FERNANDES, M. R. P.; FREITAS, J. C. O.; NASCIMENTO, J. H. O. **Ataque ácido em compósitos Portland /polímeros para poços de petróleo: mecanismos de ação**. Campinas, SP. Outubro, 2007.

OLIVEIRA, L. S. **Influência da Cal na Trabalhabilidade e na Resistência Mecânica de Argamassas.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2009.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**, 12ª edição, São Paulo: Globo, 2003.

PIOVESAN, A. Z. **Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedades de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco.** Dissertação (mestrado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 233.

SANTOS, J. R**. Betão com agregados grossos reciclados de betão**. São Paulo, SP. Revista Concreto, ISSN 1806-9673, IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**, Natal, 2008.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. São Paulo, 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

SILVA, N. G.. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária.** 2006. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

SIMIELI, D. . **Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados**. São Paulo, Brasil. Revista Exacta. ISSN 1678 -5428, Centro Universitário Nove de Julho, 2007.

SPRICIRGO, Tiago. **Utilização do rejeito proveniente das indústrias de cerâmica vermelha do sul do estado de Santa Catarina para confecção de concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso, UNISUL, 2005.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** London: Academic Press, 1990. 475p.

TOLEDO FILHO, R. D. . **Potential of crushed waste calcined-clay brick as a partial replacement of Portland cement**. American Concrete Institute, 2001 - ACI SP-202, p. 147-160.

TORRES, S. M. **The influence of chloride on the thaumasite form of sulfate attack in mortars containing calcium carbonate**. Sheffield: Faculty of Engineering. University of Sheffield, 2004. Thesis presented for the degree of doctor of philosophy. 263p.

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.

ZARDO, A. M. . **Utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como "*filler*" em compostos de fibrocimento.** In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL E X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2004, São Paulo, Brasil.