



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Rízia Amaral Araújo

**INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA
VERMELHA NAS PROPRIEDADES DE ARMAGASSAS MISTAS**

**Natal/RN
2017**

Rízia Amaral Araújo

**INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA
VERMELHA NAS PROPRIEDADES DE ARMAGASSAS MISTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr. Andreza Kelly Costa Nóbrega
Co-orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral

Natal/RN
2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação da Publicação na Fonte - Biblioteca Central Zila Mamede

Araújo, Rísia Amaral.

Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas / Rísia Amaral Araújo. - 2017.

95 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Andreza Kelly Costa Nóbrega.

Coorientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral.

1. Argilas calcinadas - Dissertação. 2. Atividade pozolânica - Dissertação. 3. Cimento Portland - Dissertação. 4. Cerâmica vermelha – Resíduos – Dissertação. 5. Cerâmica vermelha – Impactos ambientais – Dissertação. I. Nóbrega, Andreza Kelly Costa. II. Cabral, Kleber Cavalcanti. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 666.97

Rízia Amaral Araújo

**AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E SUA
INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS MISTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Andreza Kelly Costa Nobrega – Orientadora

Prof. Dr. Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral – Co-orientador

Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Examinadora Interna (UFRN)

Prof^a. Dr^a. Erica Natasche de Medeiros Gurgel Pinto – Examinadora Externa
(UFFERSA)

Natal, 06 de novembro de 2017.

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS MISTAS

Rízia Amaral Araújo

Orientador: Prof. Dr. Andreza Kelly Costa Nobrega
Co-orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral

RESUMO

A fabricação dos materiais de construção requer elevado dispêndio de energia e extração de recursos naturais, o que implica na geração de impactos ambientais preocupantes, em função da produção de resíduos gasosos e sólidos, como também mudanças desastrosas do meio ambiente. Nesse contexto, existe um inconveniente do uso de Cimento Portland, em razão do alto consumo energético e emissão de dióxido de carbono provocado pela calcinação da matéria prima. Outro material poluente é o proveniente da indústria de cerâmica vermelha, o qual emite resíduos gasosos e ainda origina demasiado volume de resíduos sólidos em virtude de falhas no processo produtivo. Por outro lado, na antiguidade, as argilas termicamente tratadas, inclusive na forma de tijolos cerâmicos finamente moídos, foram amplamente utilizadas devido às reconhecidas propriedades hidráulicas que conferiam as argamassas de cal aérea. Dessa forma, esse estudo pretende avaliar a influência do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) oriundo de telhas nas propriedades de argamassas mistas, a fim de que possa ser dado um destino adequado a esse resíduo. O RCV após cominúido em partículas menores que 0,036 mm, foi adicionado em substituição parcial ao cimento Portland no traço 1:1:6 (cimento: cal: areia) de argamassas mistas empregada em revestimentos de paredes e tetos. Inicialmente o resíduo foi caracterizado e sua atividade pozolânica investigada por de meio ensaios mecânicos, análises granulométricas, termogravimétricas e microestruturais. O teor de substituição das argamassas foi variado em 0, 10, 20 e 30% e as respectivas propriedades no estado fresco (consistência, densidade, teor de vazios e retenção de água) e no estado endurecido (absorção de água, densidade, resistência à tração na flexão e à compressão, e módulo de elasticidade) foram avaliadas. Constatou-se que

o RCV possui significativa quantidade de silicatos e aluminatos reativos, comprovadas pela expressiva atividade pozolânica que foi identificada nas análises químicas e físicas e no índice de desempenho mecânico 11% superior ao de referência. Já na produção das argamassas de revestimento com RCV obteve-se uma melhoria na trabalhabilidade, comprovada pela otimização das propriedades no estado fresco, obtidas entre os teores de substituição do cimento Portland. No estado endurecido, as propriedades físicas e mecânicas das argamassas com RCV apresentaram-se equivalentes à argamassa de referência para os traços com 20% e 30% de substituição e melhorias significantes para o traço com 10% de substituição do cimento Portland por RCV. Com isso, constata-se que o RCV apresenta características pozolânicas que resulta na melhoria das propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido, sendo o teor de 10% o mais indicado em virtude da otimização das propriedades.

Palavras-chave: Argilas calcinadas, atividade pozolânica, cimento Portland.

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA NAS PROPRIEDADES DE ARMAGASSAS MISTAS

Rísia Amaral Araújo

Adviser: Prof. Dr. Andreza Kelly Costa Nobrega

Co-Adviser: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral

ABSTRACT

The manufacture of construction materials requires high energy expenditure and extraction of natural resources, which implies the generation of disturbing environmental impacts, due to the production of gaseous and solid residues, as well as disastrous changes of the environment. In this context, there is a drawback of the use of Portland cement, due to the high energy consumption and emission of carbon dioxide caused by the calcination of the raw material. Other polluting material is that of the red ceramic industry, which emits gaseous waste and still gives rise to too much solid waste due to failures in the production process. On the other hand, in ancient times, thermally treated clays, even in the form of finely ground ceramic bricks, were widely used because of the recognized hydraulic properties that conferred lime mortars. Thus, this study intends to evaluate the influence of the red ceramic residue (CVR) from tiles in the properties of mixed mortars, so that a suitable destination can be given to this residue. The RCV, after being comminuted in particles smaller than 0.036 mm, was added in partial replacement to Portland cement in the 1: 1: 6 (cement: lime: sand) of mixed mortars used in laying of walls and covering of walls and ceilings. Initially the residue was characterized and its pozzolanic activity was investigated by means of mechanical tests, grain size, thermogravimetric and microstructural analyzes. The substitution content of the mortars was varied in 0, 10, 20 and 30% and their properties in the dry state (consistency, density, voids content and water retention) and in the hardened state (water absorption, density, resistance to flexure and compression tensile strength, and modulus of elasticity) were evaluated. It was verified that the RCV has a significant amount of reactive silicates and aluminates,

evidenced by the significant pozzolanic activity that was identified in the chemical and physical analyzes and in the mechanical performance index 11% higher than the reference value. In the production of mortars with RCV, an improvement in the workability demonstrated by the optimization of the fresh state properties obtained in the Portland cement substitution levels was obtained. In the hardened state the physical and mechanical properties of RCV mortars were equivalent to reference mortar for the traces with 20% and 30% substitution and significant improvements for the trait with 10% replacement of the Portland cement by RCV. With this, it is verified that the pozzolana obtained from the RCV is a potential Pozolana that results in the improvement of the properties of the mortar in the fresh and hardened state, being the content of 10% the most indicated due to the optimization of all the properties.

Keywords: Calcined clays, pozzolanic activity, Portland cement.

AGRADECIMENTOS

Faz-se necessário agradecer nominalmente àqueles que diretamente ou indiretamente, participaram, de alguma forma, na elaboração desta dissertação. Desta forma, expresso aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

A Deus que esteve sempre presente ao meu lado.

Aos meus pais e familiares pelo incentivo e apoio na caminho que decidi trilhar;

A minha orientadora Profª. Dra. Andreza Nóbrega pela oportunidade nas atividades de pesquisa na graduação e pela orientação desta dissertação;

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Kleber Cavalcanti, pela orientação, compreensão, paciência, empréstimo do laboratório e patrocínio de equipamentos e materiais para a pesquisa;

Aos bolsistas Kaio e Adna, pelo auxílio, sugestões, empenho e dedicação depositados para a realização dos ensaios de laboratório;

Ao amigos do mestrado Plácido, pela caronas entre os locais de aula e o RU, e Hugo pelas sugestões e esclarecimentos que precisei nas disciplinas e desenvolvimento da pesquisa;

Ao Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

Ao LABCIM, em especial pela disponibilização da estrutura laboratorial e ensaios;

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de varredura (MEV) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

Ao LABMEM pela realização dos ensaios mecânicos e PPgCEM pela realização das análises MEV, BET, FRX e DRX;

Ao LMCME localizado no departamento de Física;

Aos bolsistas e ao técnico do Laboratório de materiais de construção, Sandro, pelo auxílio prestado na realização dos ensaios e comunicação do RCV;

E a CAPES pela concessão da bolsa de estudo e apoio da pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos.....	3
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TÉORICO	4
2.1 Impactos ambientais da construção civil	4
2.2 Impactos ambientais na produção do cimento Portland	4
2.3 Impactos ambientais na indústria da cerâmica vermelha	6
2.4 Materiais pozolânicos	8
2.4.1 Mecanismo químico da reação pozolânica.....	10
2.4.2 Efeitos físicos da reação pozolânica em pastas de cimento Portland	11
2.4.3 Histórico do uso de resíduos cerâmicos em compósitos.....	14
2.5 Argamassa.....	16
2.5.1 Tipos de argamassa quanto ao aglomerante	17
2.5.2 Materiais constituintes da argamassa	18
2.5.2.1 Cimento Portland.....	18
2.5.2.2 Cal	19
2.5.2.3 Agregado miúdo	20
2.6 Propriedades da argamassa	21
2.6.1 Propriedades das argamassas no estado fresco	21
2.6.1.1 Trabalhabilidade	21
2.6.1.2 Consistência e plasticidade	22
2.6.1.3 Retenção de água	23
2.6.1.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	24
2.6.2 Propriedades da argamassa no estado endurecido	25
2.6.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido	25
2.6.2.2 Resistência à compressão e a tração na flexão	26
2.6.2.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico	27
2.6.2.4 Coeficiente de capilaridade	27
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Materiais	29
3.1.1 Cimento Portland.....	29
3.1.2 Resíduo da indústria de cerâmica vermelha	29
3.1.2.1 Beneficiamento do resíduo de cerâmica vermelha (RCV).....	29
3.1.3 Cal hidratada	31
3.1.4 Agregado miúdo	31
3.1.5 Aditivo e água.....	31
3.2 Métodos	32
3.2.1 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland	32
3.2.2 Índice de atividade pozolânica com cal	32
3.2.3 Análise química (FRX).....	33
3.2.4 Análise Mineralógica (DRX)	33
3.2.5 Análise microscópica (MEV).....	33
3.2.6 Análise de área superficial específica (BET)	33

3.2.7 Análise granulométrica a laser	34
3.2.8 Análise termogravimétrica (TG/DTG)	34
3.2.9 Análise granulométrica do agregado miúdo	34
3.2.10 Massa específica dos materiais	35
3.2.11 Massa unitária dos materiais	35
3.2.12 Definição do traço	35
3.2.13 Formulação das argamassas	35
3.2.13.1 Mistura das argamassas	36
3.2.14 Ensaios da argamassa no estado fresco.....	37
3.2.15 Índice de consistência	37
3.2.16 Densidade de Massa no Estado Fresco e teor de ar incorporado.....	37
3.2.17 Retenção de água	37
3.2.18 Ensaios da argamassa no estado endurecido.....	37
3.2.19 Resistência à compressão e a tração na flexão	38
3.2.20 Densidade de Massa no Estado Endurecido.....	38
3.2.21 Absorção de água, índice de vazios e massa específica	39
3.2.22 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade	39
3.2.23 Módulo de elasticidade	39
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCURSÕES	40
4.1 Caracterização dos materiais.....	40
4.1.1 Agregado miúdo	40
4.1.2 Caracterização dos materiais cimentantes e Investigação da reatividade do RCV	42
4.1.2.1 Caracterização do cimento Portland	42
4.1.2.2 Caracterização da cal hidratada	42
4.1.2.3 Granulometria, densidade e área superficial específica dos materiais aglomerantes	43
4.1.2.4 Caracterização microscópica, composição química e mineralógica do RCV	46
4.1.2.5 Composição mineralógica do RCV.....	49
4.1.2.6 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland	50
4.1.2.7 Resultados do teste de difração de raios X (DRX)	51
4.1.2.8 Análise TG/DTG das argamassas de cimento	54
4.1.2.9 Índice de atividade pozolânica com cal	55
4.1.2.10 Análise DRX e TG/DTG da argamassa de cal hidratada.....	56
4.1.3 Propriedades das Argamassas no estado fresco	57
4.1.3.1 Índice de consistência	58
4.1.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	59
4.1.3.3 Retenção de água	61
4.1.4 Propriedades das argamassas no estado endurecido	62
4.1.4.1 Densidade de massa no estado endurecido	62
4.1.4.2 Absorção de água por capilaridade	63
4.1.4.3 Absorção de água e índice de vazios.....	65
4.1.4.4 Módulo de elasticidade dinâmica	66
4.1.4.5 Resistência à compressão	67
4.1.4.6 Resistência à tração na flexão	69
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
5.1 Conclusões	71
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Desagregação do consumo de energia na produção de concreto.....	5
Figura 2-2 - Parcelas da emissão de dióxido de carbono	5
Figura 2-3 - Mudança na distribuição de tamanho dos poros de pastas de cimento com teores variáveis de pozolana.....	13
Figura 2-4 - Representação esquemática de pastas de cimento bem hidratadas....	14
Figura 3-1 - Planejamento experimental da pesquisa.....	28
Figura 3-2 - Material antes e após moagem.....	30
Figura 3-3 Fluxograma do beneficiamento do RCV	31
Figura 4-1 - Curva granulométrica do agregado miúdo	40
Figura 4-2 - Curva do ensaio de inchamento do agregado miúdo	41
Figura 4-3 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes.....	43
Figura 4-4 - Perfil granulométrico do RCV e CP	45
Figura 4-5 - Concentração dos óxidos nos aglomerantes	47
Figura 4-6 - Micrografias eletrônica de varredura do RCV	48
Figura 4-7 - DRX do resíduo de cerâmica vermelha (RCV)	49
Figura 4-8 - Resistência à compressão das argamassas REF e SUB	50
Figura 4-9 - DRX da argamassa de referência (REF) aos 7 e 28 dias.....	51
Figura 4-10 - DRX da argamassa com 25% de substituição (SUB25)	52
Figura 4-11 - Difratogramas das argamassas REF e SUB25	53
Figura 4-12 - Análise TG/DTG das argamassas REF e SUB25	54
Figura 4-13 - Perda de massa (%) do CH detectados nas argamassas	55
Figura 4-14 - DRX da argamassa de cal e RCV	56
Figura 4-15 - TG/DTA da argamassa de cal.....	57
Figura 4-16 - Espalhamento obtido para o ensaio de Índice de Consistência	58
Figura 4-17 - Relações a/c e a/aglo em função dos teores de RCV	58
Figura 4-18 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco	60
Figura 4-19 - Teor de ar incorporado das argamassas.....	60
Figura 4-20 - Retenção de água para as argamassas.....	62
Figura 4-21 - Densidade de massa no estado endurecido	62
Figura 4-22 - Absorção de água por capilaridade.....	63
Figura 4-23 - Ensaio de absorção por capilaridade	64
Figura 4-24 - Coeficiente de capilaridade	65
Figura 4-25 - Absorção de água por imersão das argamassas	65

Figura 4-26 - Índice de Vazios obtidos para as argamassas	66
Figura 4-27 - Módulo de elasticidade dinâmico	67
Figura 4-28 - Resistência à compressão medida aos 7 e 28 dias	68
Figura 4-29 - Resistência a tração medida aos 7 e 28 dias.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Requisitos químicos para materiais pozolânicos	9
Tabela 2-2 Requisitos físicos para materiais pozolânicos	9
Tabela 2-3 Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas	22
Tabela 2-4 - Classificação das argamassas em função da retenção de água	23
Tabela 2-5 Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado fresco	24
Tabela 2-6 - Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado endurecido	25
Tabela 2-7 Classificação das argamassas em função da resistência à compressão	26
Tabela 2-8 Classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão	26
Tabela 2-9 Classificação das argamassas em função do coeficiente de capilaridade	27
Tabela 3-1 - Quantitativo dos materiais.....	32
Tabela 3-2 Nomenclatura dos traços em volume e massa	36
Tabela 4-1 - Caracterização física do agregado miúdo	41
Tabela 4-2 Ensaios químicos e físicos do cimento CP V ARI RS	42
Tabela 4-3 Propriedades química e físicas da cal hidratada CH – I	43
Tabela 4-4 Resultado das faixas da granulometria à laser dos aglomerantes	44
Tabela 4-5 - Caracterização física dos materiais aglomerantes	46
Tabela 4-6 - Composição química dos aglomerantes (% em peso).....	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

RCV – Resíduo da indústria de cerâmica vermelha

CP – Cimento Portland

NBR – Norma Brasileira

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CCS – Compostos cimentícios suplementares

CH - Hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2)

REF – Argamassa moldada com 100% de cimento Portland de acordo com o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento descrito na norma NBR 5752 (ABNT, 2014).

SUB25 - Argamassa com cimento Portland e adição de 25 % de material pozolânico de acordo com o ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento descrito na norma NBR 5752 (ABNT, 2014).

TR – abreviação de traço

D₉₀ - Diâmetro correspondente a 90% do volume de partículas retidas

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O setor da construção é um dos pilares do desenvolvimento da economia global à custa de ser um dos principais autores no consumo de energia e materiais. Em particular, os materiais de construção afetam o meio ambiente em todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até que os produtos cheguem ao aterro, como resíduos de construção, através das etapas de fabricação, construção e uso dos edifícios (GALÁN-ARBOLEDAS *et al.*, 2017). Assim, o cimento Portland ao ser fabricado emite demasiadas quantidades de CO₂ para o meio ambiente além do alto consumo energético e de recursos naturais como argila e calcário, o que repercute no baixo desempenho ambiental dos materiais compósitos a base dele.

Atualmente, devido ao crescimento da conscientização ambiental e benefícios econômicos e técnicos, vem-se substituindo parcialmente o cimento Portland por compostos cimentícios suplementares (CCS) sustentáveis como a pozolana. Este tipo de material resulta em melhorias nas propriedades do estado fresco e endurecido, assim como no controle do calor de hidratação e redução de problemas de fluência e retracção de argamassas e concretos (RAMEZANIANPOUR; JOVEIN, 2012; ANTONI *et al.*, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SENHADJI *et al.*, 2014; TANG *et al.*, 2016).

As pozolanas são substâncias constituídas por silicatos ou aluminossilicatos reativos que por si só não possuem capacidade ligante, mas que se finamente moídos reagem com hidróxido de cálcio e água à temperatura ambiente formando silicato de cálcio hidratado (CSH) ou silicoaluminato de cálcio hidratado (CASH) (NAVRÁTILOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2016). O CSH é a principal fase sólida da pasta de cimento hidratada ocupando 50 a 60% do volume da pasta, sendo responsável pela resistência mecânica e durabilidade dos compósitos cimentícios. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No período romano o pó de tijolo era frequentemente usado como uma pozolana, na ausência de pozolanas naturais, ou como agregado, e este material ainda conferia características hidráulicas para argamassa de cal aérea e por vezes características

de impermeabilização (VEJMELKOVÁ *et al.*, 2012). As argamassas feitas com argilas tratadas termicamente obtidas a partir de subprodutos moídos também eram conhecidas por serem bastante duradouras e confiáveis. Seu número considerável de vantagens levou à sua utilização por muitos séculos. Este tipo de argamassa pode ser facilmente encontrado em edifícios históricos e sítios arqueológicos até os tempos atuais, o que é um bom indicador de sua longevidade (MATIAS; FARIA; TORRES, 2014). A atividade pozolânica dos resíduos cerâmicos conforme Mehta e Monteiro (2014) abordam, se deve à estrutura amorfa ou desordenada do aluminossilicato da argila resultante de tratamento térmico (temperaturas na ordem de 600° a 900°C).

Indústrias cerâmicas produzem grande quantidade de resíduos que são descartados indiscriminadamente no meio ambiente. Garcial *et al.* (2015) apontam que os resíduos da indústria de cerâmica vermelha atingem até 5% da produção global devido a falhas no processo e a fragilidade inerente do produto cerâmico. Isto significa, que milhões de toneladas de argilas calcinadas por ano são descartadas e/ou não recebem aproveitamento em larga escala (VIEIRA; SOUZA; MONTEIRO, 2004; MME, 2012; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010; GARCIA *et al.*, 2015; ABDI, 2016). Assim, a reciclagem e reutilização desses resíduos pode proporcionar uma economia de energia, redução de custos e preservação para o meio ambiente (KHAN *et al.*, 2016). Dessa forma, os resíduos cerâmicos podem ser utilizados em materiais à base de cimento, com benefícios ambientais decorrentes da redução, tanto da quantidade de resíduos descartados, como das emissões de CO₂ das indústrias do cimento (SCHACKOW *et al.*, 2015).

Pesquisas recentes difundem que as cerâmicas atuais podem apresentar potencial como pozolanas ou como agregados quando incorporadas em argamassas de cal e cimento, além de serem compatíveis com alvenarias de edifícios históricos, uma vez que foram apontadas como adequadas para a reparação de edifícios em virtude da sua compatibilidade química e mecânica com os materiais utilizados no passado (BINICI, 2007; VEJMELKOVÁ *et al.*, 2012; CORINALDESI, 2012; MATIAS; FARIA; TORRES, 2014; LI *et al.*, 2016; ROBAYO *et al.*, 2016).

A argamassa de revestimento de paredes e tetos deve apresentar boa trabalhabilidade no estado fresco e aderência adequada no estado endurecido, bem como facilidade de aplicação. Este compósito cimentícios na construção civil demanda

significativo consumo de cimento Portland, o qual é responsável pela oneração do custo final da obra e suscetibilidade à retração da argamassa, o que acarreta em patologias para o sistema de revestimento. Matias, Faria e Torres (2014) constatou em seu estudo que a adição de pequenas partículas de cerâmica confere características melhoradas às argamassas de cal e que as reações pozolânicas podem ocorrer, proporcionando assim argamassas com propriedades hidráulicas.

Logo esse estudo justifica-se do ponto de vista tecnológico e ambiental por introduzir um material com propriedade pozolânica em substituição parcial ao cimento Portland que irá conferir características melhoradas as argamassas, além de dar uma opção de destinação adequada aos resíduos sólidos de cerâmica vermelha da região potiguar.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) nas propriedades de argamassas mistas.

Os objetivos específicos são:

1. Caracterizar física e quimicamente o RCV;
2. Analisar o índice de atividade pozolânica do RCV junto ao cimento Portland e a cal hidratada;
3. Confeccionar argamassas substituindo parcialmente o cimento Portland por RCV
4. Avaliar as propriedades de consistência, densidade, teor de ar incorporado e retenção de água das argamassas no estado fresco;
5. Verificar a influência da adição do RCV nas propriedades mecânicas e físicas da argamassa no estado endurecido;
6. Analisar a microestrutura da argamassa após a adição de RCV.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Impactos ambientais da construção civil

Conforme Agopyan e Jonh (2011), o setor da construção é essencial para atender as necessidades e anseios da sociedade, ao proporcionar abrigo, conforto e qualidade de vida para os indivíduos, famílias e comunidades, além de estimular o crescimento, implantação de infraestrutura e produzir riquezas para comunidades, empresas e governos. Ao mesmo tempo, o setor é responsável por uma parcela significativa do consumo de recursos naturais, incluindo energia e água, sendo um dos maiores responsáveis pela geração de resíduos sólidos e pela emissão de gases de efeito estufa.

Atualmente existe um inconveniente no uso o cimento Portland, tanto pelo seu custo quanto pelos seus efeitos ambientais negativos gerados na sua produção. Como os demais produtos da construção civil, a indústria da cerâmica vermelha demanda em sua produção grandes consumos e impactos, sendo esses: consumo de água, consumo de recursos naturais, consumo energético, emissão de resíduos sólidos e líquidos, emissão de material particulado e emissões gasosas.

2.2 Impactos ambientais na produção do cimento Portland

O uso do cimento Portland é expressivo na construção civil por suas inúmeras aplicações, como: pastas, argamassas, concretos, grautes e outros compósitos, que servem a execução de artefatos como blocos, postes, pavimentos, estacas até os mais diversos elementos estruturais. No entanto o cimento Portland é o grande responsável pelo baixo desempenho ambiental dos materiais compósitos a base dele. Torgal e Jalali (2010) elucidam este fato por meio do gráfico da energia envolvida na mistura de concreto ilustrado na Figura 2.1.

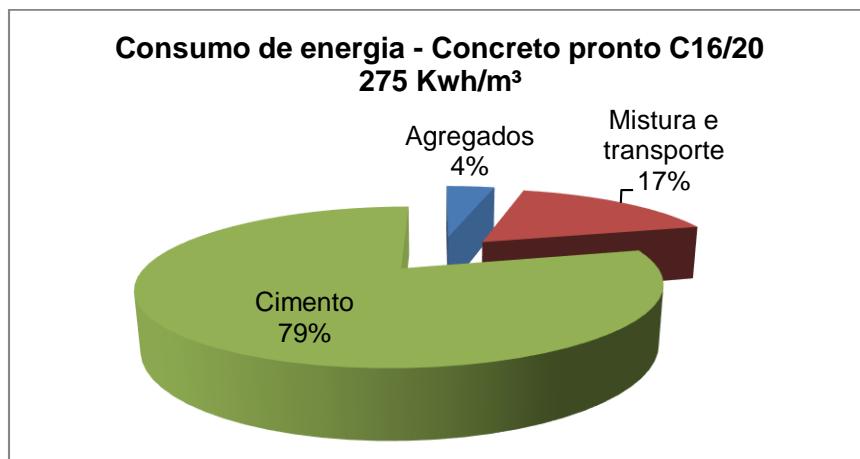


Figura 2-1 Desagregação do consumo de energia na produção de concreto
Fonte: Togal e Jalali (2010)

A produção do cimento está associada a elevado impactos ambientais devido à extração de matérias-primas não renováveis (calcário e argila) e altas emissões de dióxido de carbono. A produção de 1t de cimento Portland emite 0,94t de CO₂ e ainda consome mais de 1,5t de matérias-primas e 2,93-6,28GJ de energia térmica, além de 65 a 141kWh de energia elétrica (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2017; STAFFORD *et al.*, 2016). Segundo Gartner (2004) uma parcela da emissão de CO₂ ocorre através da descarbonatação do calcário (CaCO₃) conforme Figura 2.2.

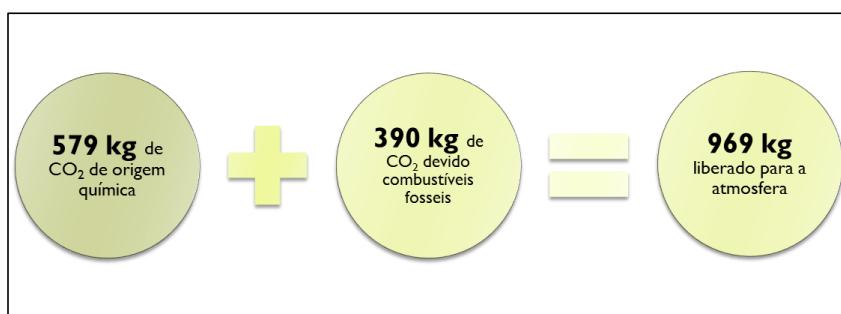


Figura 2-2 - Parcelas da emissão de dióxido de carbono
Fonte: Gartner (2004)

Portanto, para cada tonelada de clínquer, é liberado para a atmosfera 579 kg de CO₂ de origem química e isto independe da eficiência do processo utilizado. A este valor é ainda necessário somar aproximadamente 390 kg de CO₂ devido à utilização de combustíveis fósseis consumidos durante a produção do clínquer.

Este fato contribui para agravar de forma substancial os impactos ambientais que estão associados à fabricação deste material. Nesse contexto, a substituição de cimento Portland ainda que parcial por resíduos reativos ou a substituição de agregados naturais por agregados provenientes de resíduos de outras indústrias,

assume um papel fundamental na sustentabilidade dos materiais de construção (Meyer, 2009).

Assim sendo, o elevado volume de recursos minerais necessário para satisfazer quer o consumo de agregados, quer o consumo de cimento Portland, representam assim uma oportunidade notável para o reaproveitamento de resíduos de outras indústrias.

2.3 Impactos ambientais na indústria da cerâmica vermelha

O setor de cerâmica vermelha para construção utiliza basicamente como matéria-prima a argila. A preparação da massa usada para produção de peças de cerâmica vermelha é feita pela mistura de dois tipos de argila: uma magra (rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como um material redutor de plasticidade) e outra gorda (de alta plasticidade, granulometria fina e composta essencialmente de argilominerais). A ANICER (2016) relata que o setor da cerâmica vermelha possui cerca de 6.903 empresas, entre cerâmicas e olarias, sendo responsáveis por quase 300 mil empregos diretos, 900 mil indiretos, com um faturamento anual de R\$ 18 bilhões e uma representatividade em torno de 4,8% da construção civil. Mensalmente, são produzidos mais de 4 bilhões de blocos de vedação e estruturais, e 1,3 bilhões de telhas.

Ainda segundo Anicer (2016), somente no Rio Grande do Norte, as cerâmicas chegam a movimentar cerca de R\$ 208 milhões por ano no estado. No total, são 186 empresas formalizadas, distribuídas em 42 municípios, que empregam 6,4 mil pessoas. Essa indústria produz, em média, 111 milhões de peças por mês em solo potiguar, sendo 54% telhas, 42% blocos de vedação e 4% outros produtos. Conforme SEBRAE e CTGAS (2012), a região Seridó é responsável por 87% de toda telha produzida no RN e por 57% de tudo que é produzido no Estado. Para esta produção as cerâmicas do RN consomem mensalmente 239.561 toneladas de argila e 102.844 metros cúbicos de lenha.

Os principais impactos ambientais relacionados à indústria de cerâmica vermelha estão geralmente associados a fatores como: degradação das áreas de extração de argila, consumo de energia, geração de resíduos sólidos decorrentes de

perdas por falhas na qualidade do produto, emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa como o dióxido de carbono.

É relevante citar que a nível mundial os subsetores de tijolos e telhas de cerâmica, refratários e revestimentos de paredes e pavimentos em conjunto emitiram um total de 19 Mt de CO₂ em 2010. Destas emissões, 66% foram devidos à combustão de combustíveis, 18% de eletricidade e 16% inerente ao processo de produção (CERAMIE-UNIE, 2012). De acordo com as estatísticas, a indústria de tijolos pode gerar 180 kg de CO₂/tonelada de tijolos, o que é 5 vezes menor que o devido à formação de clínquer (MOHAMMED, 2017).

A última etapa de produção da cerâmica, queima e inspeção, é a principal responsável pela emissão de resíduos sólidos. Após as peças serem retiradas do forno, as mesmas são inspecionadas em um pátio, onde as peças são retiradas por defeitos de queima ou de falta de integridade. Como esses produtos foram queimados e a matéria prima se encontra praticamente inerte, não é possível a introdução desses resíduos na linha de produção, como acontece na etapa de extrusão ou secagem, entre outras (GRICOLETTI, 2001).

Na Europa, a quantidade de resíduos oriundos das diferentes fases de produção da indústria cerâmica atinge cerca de 3-7% da sua produção global, o que significa milhões de toneladas de argilas calcinadas por ano são apenas depositadas em aterros (PACHECO-TORGAL E JALALI, 2010). No Brasil, predominam os fornos de baixa eficiência do tipo intermitente, nos quais as perdas no pós-queima podem variar de 5% (nas cerâmicas mais estruturadas e com tecnologia mais moderna) a 20% (nas cerâmicas mais desorganizadas e defasadas tecnologicamente)" (MME, 2012; ABDI, 2016). No Estado de São Paulo, estima-se que as perdas em produtos acabados situam-se na faixa de 3% a 5%, representando um descarte anual de cacos cerâmicos de cerca de 0,8 a 1,3 milhão de toneladas no território paulista (GARCIA et al., 2015). Algumas indústrias cerâmicas de menor porte em Campos (RJ), por exemplo, chegam a apresentar 10% de perda da produção somente na etapa da queima (VIEIRA; SOUZA; MONTEIRO, 2004; ABDI, 2016).

No cenário brasileiro a lenha é o principal combustível utilizado no segmento de cerâmica vermelha, sendo assim o consumo de energia nesse setor tem grande impacto ecológico em virtude dos efluentes gasosos e particulados gerados pela queima desse combustível (MME, 2012).

Dessa forma, os resíduos cerâmicos podem ser utilizados em materiais à base de cimento, com benefícios ambientais decorrentes da redução tanto da quantidade de resíduos descartados como das emissões de CO₂ das indústrias do cimento e (SCHACKOW, 2015).

2.4 Materiais pozolânicos

De acordo com norma 232.1R-00 (ACI, 2000), o material pozolânico é definido como "material silicioso e silicoaluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma atividade cimentante, mas que, quando finamente moído e na presença de água, reagem quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas normais para formar compostos dotados de propriedades cimentícias". A pozolanidade dos materiais conforme a norma NBR 12653 (ABNT, 2012) depende da sua composição química. A soma dos oxídios de Al, Si e Fe devem ser maior que 70 %. Mohammed (2017) acrescenta que a reação pozolânica leva a formação de compostos cimentícios suplementares - CCS (CSH, CAH, CASH) comparável àqueles formados durante a hidratação comum do cimento.

Segundo Seco *et al.* (2012), atualmente, os materiais pozolânicos são frequentemente utilizados no setor de construção. Na engenharia civil, a técnica de estabilização do solo utiliza estes materiais como ligantes. Nos edifícios o uso de materiais pozolânicos é também muito importante nos elementos estruturais, etc. De ambas as aplicações da pozolana, a mais usual é a adição no Cimento Portland (CP), um dos principais materiais de construção atuais, com uma produção anual, estimada em 2010 de 3.300.000 toneladas (USGS, 2011).

A norma NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica as pozolanas em N, C e E. O RCV enquadra-se na Classe N - Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis nesta norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, "cherts" silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Essa norma estabelece as condições específicas para que um material se adeque a condição de pozolana, sendo os requisitos químicos e físicos descritos na Tabela 2.1 e 2.2:

Tabela 2-1 Requisitos químicos para materiais pozolânicos

Propriedades	Classe do material pozolânico		
	N	C	E
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, % mín.	70	70	50
SO₃, % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na₂O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

Um material pozolânico deve apresentar em sua composição um mínimo de sílica amorfia e alumina, para garantir a reatividade química. Além disso, para melhorar seus efeitos químicos e físicos, esses materiais devem ter pelo menos a mesma finura que o cimento Portland (MOHAMMED, 2017). Na Tabela 2.2 tem-se que a norma NBR 12653 (ABNT, 2014) requer que este tipo de material possua menos de 20% de material retido na peneira com abertura de 45 µm.

Tabela 2-2 Requisitos físicos para materiais pozolânicos

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	V	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 20 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	≥ 6,0 MPa	≥ 6,0 MPa	≥ 6,0 MPa	ABNT NBR 5751

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

A adição de pozolanas ao cimento Portland ou sua utilização juntamente com a cal permitem a substituição parcial ou, em certas aplicações, a substituição total do cimento. Isto supõe uma redução nos resíduos, no consumo de energia e na emissão de CO₂, menor custo de produção e às vezes melhorado propriedades de engenharia (SECO *et al.*, 2012).

Os materiais pozolânicos podem ser naturais ou obtidos como subproduto de resíduos da indústria e agricultura. Segundo Mehta e Monteiro (2008), dentre os naturais, quanto à origem, temos: origem derivada de rochas e minerais vulcânicos –

Vidros vulcânicos, tufos vulcânicos e argilas ou folhelhos calcinados; e origem organogênica – terras diatomáceas.

Quanto aos materiais pozolânicos obtidos como subproduto de resíduos da indústria e agricultura Seco *et al.* (2012) apontam em seu estudo os potenciais resíduos para uso como pozolanas:

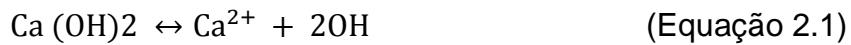
- i. Cinza volante - são resíduos finamente resultantes da combustão do carvão em geradores nas usinas termoelétricas.
- ii. Escórias de alto-forno - subproduto obtido durante a produção de ferro-gusa.
- iii. Sílica ativa - resíduo industrial produzido a partir do processo de fundição de silício metálico e ligas ferro-silício. Contém quantidades elevadas de substâncias extremamente finas e amorfas SiO₂.
- iv. Cinza da casca de Arroz – resultante da queima da casca de arroz como combustível em usinas geradoras.
- v. Fosfogesso - subproduto da reação química entre o ácido sulfúrico e o fosfato para produzir ácido fosfórico.
- vi. Resíduos cerâmicos - Os resíduos de cerâmica incluem todos os resíduos de tijolos, telhas e outros materiais à base de argila. Estes materiais quando moídos têm propriedades pozolânica em virtude do processo térmico que a argila sofre, deixando os óxidos de Al e Si num estado amorfo.
- vii. Lodo de Esgoto - A maioria destes materiais tem frequentemente uma teor de metais pesados, tornando mais difícil sua utilização como material de construção.

2.4.1 Mecanismo químico da reação pozolânica

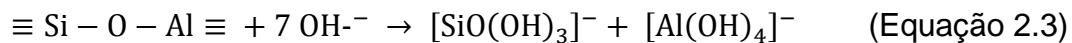
As pozolanas proporcionam melhorias nas propriedades mecânicas e físicas dos compósitos ao longo do desenvolvimento das reações pozolânicas com o tempo. A sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), desde que reativas, presentes em materiais pozolânicos, quando combinado com o Ca(OH)₂ e água (necessária para a hidratação) formam silicatos e aluminatos de cálcio. O produto final é, por conseguinte, capaz de endurecer, na presença de água (FARIA-RODRIGUES P., 2009).

A atividade pozolânica é a capacidade de substâncias reagirem com hidróxido de cálcio na presença de água à temperatura normal de modo a formar produtos de

hidratação. Essa atividade pode ser determinada pela quantidade de óxido de cálcio necessário para reagir com a pozolana e pela cinética da reação. O hidróxido de cálcio é uma base parcialmente dissociada em um meio aquoso, conforme Equação 2.1 (NAVRÁTILOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2016).



Segundo Navrátilová, Rovnaníková (2016) e Shi (2000), uma solução saturada de hidróxido de cálcio possui um pH de 12,45 a 25 ° C. Uma alta concentração de íons OH⁻ provoca a quebra das ligações em SiO₂, silicatos e aluminossilicatos, produzindo íons simples de acordo com o esquema da Equação 2.2 e 2.3:



O íons silicato e aluminato resultantes, em contato com íons Ca²⁺, formam compostos de silicatos hidratados do tipo CSH, aluminato de cálcio C₄AH₁₃, guelenita hidratada C₂ASH₈ e C₃A·CaCO₃·12H₂O.

Os componentes de silicato dissolvem-se mais rapidamente do que o aluminato e uma maior concentração de Ca²⁺ é necessária para a formação de aluminato de cálcio. Primeiro géis de CSH precipitam-se nas partículas de pozolanas, após isso os aluminatos de cálcio precipitam na forma de folhas hexagonais na superfície desses géis CSH (SECO *et al.*, 2012).

O CSH é a principal fase sólida da pasta de cimento hidratada ocupando 50 a 60% do volume da pasta. Esta fase é responsável pela resistência mecânica e durabilidade dos compósitos cimentícios. Este fato se deve pela sua estrutura em camadas com uma elevada área superficial. Comparado ao CSH, a potencial contribuição à resistência do CH (hidróxido de cálcio) é limitada devido à sua área superficial consideravelmente mais baixa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.4.2 Efeitos físicos da reação pozolânica em pastas de cimento Portland

Mehta e Monteiro (2008) citam que a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada de reação pozolânica, essa reação resulta principalmente em três

aspectos que justificam a importância técnica do uso de pozolanas em materiais cimentícios:

- 1 - A reação é lenta; assim, as taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência também são lentas;
- 2 - A reação consome hidróxido de cálcio em vez de produzi-lo (conforme Equação 2.4 e 2.5), o que tem um importante papel na durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos;

Cimento Portland



(Cimento Portland ou Cal) + pozolana



- 3 - Estudos sobre a distribuição do tamanho dos poros nos cimentos hidratados com pozolanas mostraram que os produtos da reação são muitos eficientes em preencher espaços capilares, melhorando, assim, a resistência e impermeabilidade do sistema. Isto é devido a dois efeitos denominados Refinamento do tamanho dos poros e Refinamento do tamanho do grão.

Para compreender os efeitos de “Refinamento do tamanho dos poros” e “Refinamento do tamanho do grão” convém saber que em uma pasta de material cimentício hidratada existe basicamente dois tipos de vazios, os vazios capilares e os vazios de ar incorporado. Mehta e Monteiro (2014) explicam que os vazios capilares compreendem os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta cimentícia hidratada e variam de 50nm a 5µm em função da relação a/c. E os vazios de ar incorporado consistem em vazios de formato esférico, ao passo que os vazios capilares são de forma irregular. Os vazios de ar incorporado são decorrentes do aprisionamento de ar durante a mistura do compósito e podem chegar até 3mm; normalmente variam de 50 a 200 µm.

- **Refinamento do tamanho dos poros**

A formação de produtos de hidratação secundários (principalmente silicatos de cálcio hidratados) em torno de partículas de pozolana tende a preencher os vazios capilares grandes com um material microporoso de baixa densidade. Assim sendo, o processo de transformação de um sistema contendo grandes vazios capilares em um produto microporoso contendo numerosos poros finos é denominado “Refinamento do tamanho dos poros”.

- **Refinamento do tamanho do grão**

A nucleação do hidróxido de cálcio em torno de partículas finas e bem distribuídas da pozolana terá o efeito de substituir os grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados por numerosos cristais pequenos e menos orientados, além dos produtos de reação pouco cristalinos. O processo de transformação de um sistema contendo grandes grãos de um composto em um produto contendo grãos menores é denominado “Refinamento do tamanho do grão”.

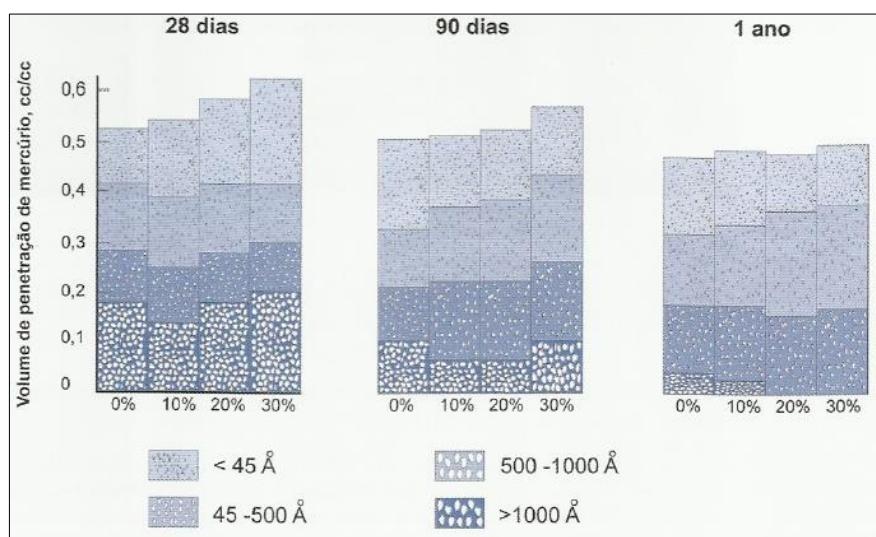


Figura 2-3 - Mudança na distribuição de tamanho dos poros de pastas de cimento com teores variáveis de pozolana

FONTE: Mehta, Monteiro (2008)

O processo de refinamento tanto do tamanho dos poros quanto do tamanho dos grãos aumenta a resistência da pasta de cimento, assim como, reforça a pasta na zona de transição de concretos, reduzindo, dessa forma, as microfissuras e aumentando a impermeabilidade do concreto.

Esse processo está associado à reação pozolânica e resulta na mudança da distribuição de poros na pasta de cimento. Conforme Figura 2.3, Mehta e Monteiro (2008) explicam que as pastas de cimento com teor de pozolana de 20 % e 30 % curadas por um ano não apresentaram poros grandes ($> 0,1 \mu\text{m}$). Em suma, os ensaios de permeabilidade à água mostraram que essas pastas de cimentos eram muito mais impermeáveis do que as pastas de cimento Portland de referência, isso se deve a uma pasta bem hidratada, conforme representação da Figura 2.4.

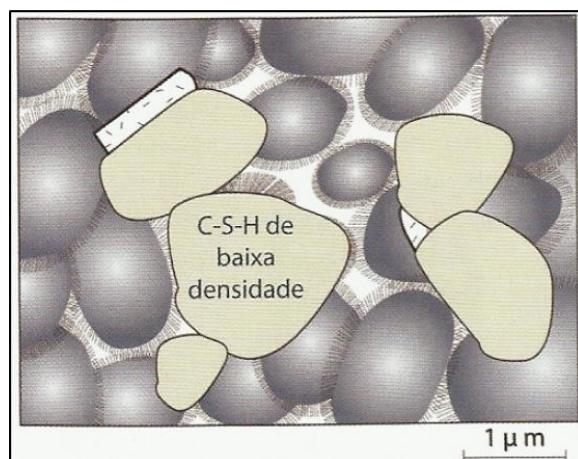


Figura 2-4 - Representação esquemática de pastas de cimento bem hidratadas
FONTE: Mehta, Monteiro (2008)

2.4.3 Histórico do uso de resíduos cerâmicos em compósitos

A atividade pozolânica dos resíduos cerâmicos pode ser explicada conforme Metha e Monteiro (2008): Argilas e folhelhos não apresentam uma reatividade considerável com cal a menos que as estruturas cristalinas dos minerais argilosos presentes sejam destruídas por tratamento térmico (temperaturas na ordem de 600° a 900°C). A atividade pozolânica do produto normalmente se deve à estrutura amorfa ou desordenada do aluminossilicato da argila resultante de tratamento térmico. Segundo Mohammed (2017), nestes materiais, os minerais de filito estão na origem dessa pozolanicidade.

Toledo Filho *et al.* (2007) analisaram a viabilidade da substituição parcial de cimento com resíduos de tijolo em argamassas. Resultados promissores foram obtidos para substituição de até 20% do ligante. Tendo que, parâmetros como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de argamassas de cimento não foram afetados.

Silva *et al.*, (2009) em seu estudo, constataram que a absorção de água por ação capilar era inversamente proporcional ao aumento percentual de substituição. Isto é, devido à redução dos tamanhos dos poros, que podem ser preenchidos com o pó de cerâmica, houve a uma consequente redução da água absorvida. As argamassas com resíduos de cerâmica resultaram em um melhor comportamento em relação a retenção de água, uma vez que maior capacidade de retenção de água é benéfica para argamassa em seu período de hidratação.

Vejmelková *et al.* (2012) descrevem que no período romano o pó de tijolo era frequentemente usado como uma pozolana, na ausência destas naturais, e que este material ainda conferia características hidráulicas para argamassa de cal de ar e por vezes características de impermeabilização.

Corinaldesi (2012) estudou argamassas de assentamento sustentáveis quimicamente compatíveis para reparação de edifícios históricos. Dois agregados de tijolos esmagados foram adicionados às argamassas de cal substituindo a areia. Os resultados obtidos mostraram que o uso de tijolos reciclados em vez de areia virgem, se finamente moído, melhoram a resistência de aderência argamassa-tijolo, e a absorção capilar de argamassa.

Matias, Faria e Torres (2014), no artigo referente a revisão do assunto, relataram que produtos como argila tratada termicamente e cinzas têm sido frequentemente detectado em argamassas antigas. Sabe-se também que as argilas termicamente tratadas oriundas de produtos cerâmicos como tijolos foram extensivamente moídos e incorporados em argamassas de cal nos tempos antigos. Os romanos dominaram a utilização de resíduos de tijolo e cal aérea na argamassa como cita Baronio, Binda e Lombardini (1997).

Matias, Faria e Torres (2014) citam que quando combinada com cal, o pó cerâmica pode atuar como pozolana, quando o seu teor de alumina e sílica reagem com o óxido de cálcio a partir de cal. Além da área superficial específica do material de cerâmica ser significativa, esta reação é essencialmente governado pelas temperaturas de aquecimento e as consequentes quantidades de sílica e alumina no estado amorfo.

Schackow *et al.* (2015) investigaram argamassas produzidas com resíduo de tijolos de argila cozida como material pozolânico substituindo parcialmente o cimento

Portland em até 40%. Foi utilizado relação água/cimento constante para todos traços e concluiu-se que a adição do resíduo gerou mudanças microestruturais que promoveram o melhor desempenho físico e mecânico das argamassas, sendo o teor de 10% (em peso) de resíduo de tijolo, o mais recomendado em função da trabalhabilidade equivalente a argamassa de referência.

Torres e Matias (2016) estudaram e recomendam a produção de argamassas de revestimento sustentáveis a partir de cal e RCV para reparo de patrimônio histórico. As argamassas com resíduo cerâmico vermelho apresentaram diminuição da absorção de água, aumento da capacidade de secagem e diminuição da permeabilidade ao vapor de água

Li *et al.* (2016) utilizaram resíduos de tijolos vermelhos para produção de reboco decorativo a base de gesso para revestimento e obtiveram melhorias na resistência mecânica e a penetração de água dos revestimentos.

Navrátilová e Rovnaníková (2016) caracterizaram química e fisicamente pós de 6 tipos de tijolos e aplicaram-os em argamassas de cal modifica com traço 1:3. Os pós foram usados em substituição a cal hidratada no teor de 50% e foi constatado que o pó de tijolo melhorou as propriedades mecânicas das argamassas.

Castro *et al.* (2017) estudaram no seu trabalho o resíduo de cerâmica vermelha moído para a produção de uma adição mineral. Esse resíduo foi combinado com um cimento Portland de alta resistência inicial para a produção de cimentos compostos. E a partir dos resultados obtidos, verificou-se que os cimentos compostos com RCV atenderam aos requisitos químicos e físicos das normas correspondentes. Quanto às propriedades mecânicas, esses cimentos apresentaram desempenho mecânico superior aos cimentos comerciais, com valores de resistência até 50% maior que os respectivos cimentos compostos comerciais.

2.5 Argamassa

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivo, com propriedades de aderência e endurecimento. A referida norma classifica e define os diversos tipos de argamassa de acordo com o uso e aplicação de cada uma delas:

a) Argamassa para assentamento

- Argamassa para assentamento em alvenaria de vedação: Argamassa indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação.
- Argamassa para assentamento em alvenaria de estrutural: Argamassa indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função estrutural.
- Argamassa para complementação da alvenaria (encunhamento): Argamassa indicada para fechamento da alvenaria de vedação, após a última fiada de componentes.

b) Argamassa para revestimento de paredes e tetos

- Argamassa para revestimento interno: Argamassa indicada para revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).
- Argamassa para revestimento externo: Argamassa indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).

c) Argamassa de uso geral: Argamassa indicada para assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos e externos.

d) Argamassa para reboco: Argamassa indicada para cobrimento de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento; também denominada massa fina.

e) Argamassa decorativa em camada fina: Argamassa de acabamento indicada para revestimentos com fins decorativos, em camada fina.

f) Argamassa decorativa em monocamada: Argamassa de acabamento indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos de edificação em contato com o meio externo, aplicada em camada única e com fins decorativos.

2.5.1 Tipos de argamassa quanto ao aglomerante

A norma NBR 13529 (ABNT, 2013), classifica a argamassa de revestimento em função do tipo de aglomerantes utilizado na mistura.

- **Argamassa de cal:** Numa argamassa onde há apenas a presença de cal, sua função principal é funcionar como aglomerante da mistura. Neste tipo de argamassa, destacam-se as propriedades de trabalhabilidade e a capacidade de absorver deformações. Entretanto, são reduzidas as suas propriedades de resistência mecânica e aderência.
- **Argamassa de cimento:** A contribuição do cimento nas propriedades das argamassas está voltada, sobretudo para a resistência mecânica. Além disso, o fato de ser composto por finas partículas contribui para a retenção da água de mistura e para a plasticidade. Se, por um lado, quanto maior a quantidade de cimento presente na mistura, maior é a retração, por outro, maior também será a aderência à base.
- **Argamassa mista:** Em argamassas mistas, de cal e cimento, devido à finura da cal há retenção de água em volta de suas partículas e consequentemente maior retenção de água na argamassa. Assim, a cal pode contribuir para uma melhor hidratação do cimento, além de contribuir significativamente para a trabalhabilidade e capacidade de absorver deformações.

2.5.2 Materiais constituintes da argamassa

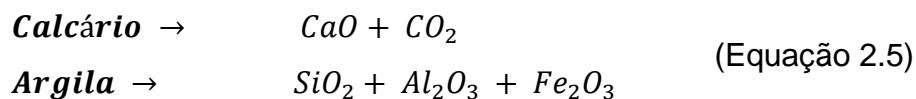
Faz-se necessário discutir os materiais utilizados em argamassas mistas de revestimento mais comuns. Dentre eles, cimento Portland, cal hidráulica e agregado miúdo.

2.5.2.1 Cimento Portland

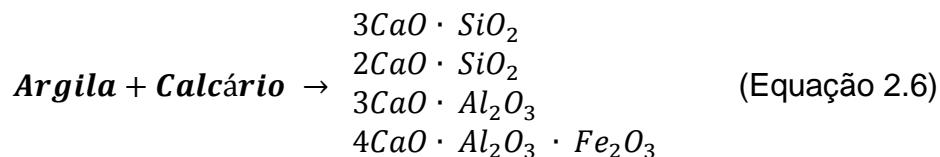
O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, em conjunto com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, em proporções que varia de 3% a 5% em massa, e eventuais adições facultativas, conforme o tipo de cimento, durante o processo de fabricação (BATTAGIN; BATTAGIN, 2010).

Tendo em vista que os silicatos de cálcio são os constituintes primários do cimento Portland, a matéria prima para a produção do clínquer deve conter os minerais cálcio e sílica em formas e proporções adequadas, sendo esta demanda suprida por pedras calcárias e argila.

As reações químicas que ocorre no sistema de fornos de cimento podem ser expressas como a seguir (MEHTA; MONTEIRO, 2008):



Na Equação 2.6 são representados os compostos potenciais formados pela calcinação da matéria prima. Sendo eles o silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico.



Mehta e Monteiro (2008) relatam que o cimento Portland adquire propriedade adesiva somente quando misturado com água. Isso se dá porque a reação química do cimento com a água, denominada hidratação do cimento, resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento. Segundo os mesmos autores, o volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada é composto por quatro fases sólidas: CSH (50-60%), CH (20-25%), sulfoaluminato de cálcio (10-15%) e grãos de clínquer não hidratados.

O CSH é a principal fase sólida da pasta de cimento Portland hidratada. Está é responsável pela resistência mecânica e durabilidade dos compósitos cimentícios. De acordo Mehta, Monteiro (2008), esse fato se deve sua estrutura em camadas com uma elevada área superficial. Comparado ao CSH, a potencial contribuição à resistência do CH (hidróxido de cálcio) é limitada devido à sua área superficial consideravelmente mais baixa. Os sulfoaluminatos de cálcio por sua vez possuem um papel secundário nas relações microestrutura-propriedades da pasta de cimento hidratada.

2.5.2.2 Cal

A cal é um ligante inorgânico, produzido a partir de rochas carbonáticas, composto basicamente de cálcio e magnésio. Existem duas formas de cal no mercado: cal virgem e cal hidratada. Uma das características mais importantes na engenharia é a sua área superficial específica, cerca de 10 vezes maior que a dos cimentos. (CINCONTO; QUARCIANI; JONH, 2010).

A cal hidratada, por sua vez é um aglomerante bastante utilizado em argamassas de revestimento. Cinconto, Quarcioni e Jonh (2010) afirmam que esta argamassa endurece devido à evaporação da água de amassamento que libera os poros para penetração do CO₂. Esse gás reage com o óxido substituindo a água de hidratação ao longo do tempo e regenerando o carbonato.

As cales hidratadas ou hidróxido de cálcio, para argamassas são classificadas de acordo com a norma NBR 7175 (ABNT, 2003) em três tipos: CH-I, CH-II e CH-III, variando respectivamente na ordem de maior pureza química e granulometria, sendo a CH-I a maior pureza e melhor qualidade.

Guimarães (2002) relata que a cal acrescenta melhorias sensíveis às argamassas por ter cristalitos muito pequenos e com capacidade de reter em sua volta uma película de água firmemente aderida. Algumas vantagens decorrentes da capacidade de retenção de água da cal hidratada na argamassa são:

- a) Permite regular perda de água para elementos construtivos vizinhos com alta porosidade;
- b) Melhor interface bloco construtivo/argamassa
- c) Melhor trabalhabilidade das argamassas
- d) Melhor absorção dos acomodamentos iniciais das estruturas, em função da maior flexibilidade das ligações;
- e) Melhor estocagem da água necessária ao desenvolvimento das reações que provocam o aparecimento de constituintes cimentantes.

2.5.2.3 Agregado miúdo

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) o define como uma areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. Os agregados miúdos representam cerca de 60% a 80% do consumo dos materiais da argamassa pronta e por isso resultam em significativa influência no seu comportamento no estado fresco, bem como no desempenho do revestimento. (CARASEK, 2010).

Segundo Guimarães (2002), a granulometria da areia tem grande influência nas seguintes propriedades da argamassa: trabalhabilidade, retenção de água,

elasticidade, retração na secagem, porosidade, aderência, resistência mecânica e impermeabilidade. Sendo assim, uma areia com elevado teor de grãos angulosos e baixo módulo de finura resultará em uma argamassa menos trabalhável e com desempenho no estado endurecido inadequado.

2.6 Propriedades da argamassa

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece requisitos para algumas das propriedades da argamassa de revestimento de paredes e tetos, esta norma ainda classifica-as conforme as características e propriedades que apresentam.

As principais funções de um revestimento de argamassa de parede são (CARASEK, 2010):

- Proteger a alvenaria e a estrutura contra ação do intemperismo, no caso dos revestimentos externos;
- Integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como: isolamento térmico (~30%), isolamento acústico (~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.

2.6.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

Dentre as mais importantes propriedades das argamassas no estado fresco, estão a trabalhabilidade, a consistência, a retenção de água, a densidade de massa e o teor de ar incorporado.

2.6.1.1 Trabalhabilidade

Trabalhabilidade é propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea (CARASEK, 2010). Essa propriedade também garantirá o adequado desempenho do revestimento em serviço, uma vez que várias propriedades da argamassa no estado endurecido serão afetadas

pelas condições de aplicação (estado fresco), como é o caso da aderência. A trabalhabilidade é uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, estas são apresentadas na Tabela 2.2:

Tabela 2-3 Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

Propriedade	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material.
Adesão Inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.

Fonte: Carasek (2010)

2.6.1.2 Consistência e plasticidade

Do ponto de vista do comportamento reológico das argamassas, a consistência, que diz respeito à sua maior ou menor fluidez, está associada à capacidade da mistura em resistir ao escoamento. Portanto, argamassas de consistências mais fluidas representam misturas com menores valores de tensão de escoamento, sendo verdadeira a recíproca. Ainda em termos reológicos, a plasticidade está relacionada com a viscosidade da argamassa (CARASEK, 2010).

Guimarães (2002) define plasticidade, no caso das argamassas, como a característica que as tornam deslizantes e de fácil espalhamento, sem separação da água ou segregação do material sólido da mistura.

A norma NBR 13276 (ABNT, 2005) apresenta um método para a medida da consistência, dando, assim, parâmetros para a avaliação indireta da trabalhabilidade e possibilitando principalmente um controle da argamassa no estado fresco. Este

método impõe à argamassa uma deformação por meio de vibração ou choque, medindo ao mesmo tempo a consistência e a plasticidade.

2.6.1.3 Retenção de água

A retenção de água é uma propriedade que está associada à capacidade da argamassa fresca manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação seja pela absorção de água da base (CINCOTTO; SILVA; CASCUDO, 1995). Assim, essa propriedade torna-se mais importantes quando a argamassa é aplicada sobre substratos com alta sucção de água ou as condições climáticas estão mais desfavoráveis (alta temperatura, baixa umidade relativa e ventos fortes).

Esta propriedade além de interferir no comportamento da argamassa no estado fresco (como no processo de acabamento e na retração plástica), também afeta as propriedades da argamassa endurecida. Após o endurecimento, as argamassas dependem, em grande parte, de uma adequada retenção de água, para que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes se efetuem de maneira apropriada. Dentre estas propriedades podem ser citadas a aderência, a resistência mecânica final e a durabilidade do material aplicado.

A norma NBR 13277 (ABNT, 2005) normatiza um método para avaliação da retenção de água, este método consiste na medida da massa de água retida pela argamassa após a sucção realizada por meio de uma bomba de vácuo a baixa pressão, em um funil de filtragem. A norma em questão classifica as argamassas em função da sua retenção de água, conforme apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2-4 - Classificação das argamassas em função da retenção de água

Classe	Retenção de água %	Método de ensaio
U1	≤ 78	
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	ABNT NBR 13277
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Segundo Carasek (2010) a retenção de água da argamassa varia em função da composição, sendo maior para as argamassas com aditivo retentor de água,

seguida pelas argamassas mistas de cal e cimento, e tendo por último, argamassas de cimento.

2.6.1.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Em obra, é preciso garantir a aplicabilidade da argamassa para que se possa ter sua correta aplicação pelo operário. Assim, quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será em longo prazo, o que reduz o esforço do operário na sua aplicação, resultando em um aumento de produtividade ao final da jornada de trabalho. A densidade de massa das argamassas, também denominada de massa específica, varia com o teor de ar e com a massa específica dos materiais constituintes da argamassa, prioritariamente do agregado (CARASEK, 2010). A partir deste dado é estimado o consumo de cada argamassa por uma unidade de área e espessura (CEOTTO; BANDUK E NAKAKURA, 2005).

A densidade de massa das argamassas no estado fresco é determinada pelo método da norma NBR 13278 (ABNT, 2005) e representa a relação entre a massa e o volume do material sendo expressa em g/cm³, com duas casas decimais. A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) apresenta uma classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco, apresentada na Tabela 2.5.

Tabela 2-5 Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado fresco

Classe	Densidade de massa no estado fresco kg/m ³	Método de ensaio
D1	≤ 1 400	
D2	1 200 a 1 600	
D3	1 400 a 1 800	
D4	1 600 a 2 000	ABNT NBR 13278
D5	1 800 a 2 200	
D6	> 2 000	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Diretamente associado à densidade de massa das argamassas com agregados de massa específica normal, está o teor de ar. O teor de ar das argamassas pode ser determinado tanto pelo método gravimétrico (empregando a mesma norma NBR 13278, (ABNT, 2005), como pelo método pressométrico fazendo uma adaptação do método para concreto da norma NBR NM 47 (ABNT, 2002). Logo a densidade de massa está diretamente ligada ao teor de ar incorporado, quanto maior o teor de ar

incolorado de uma mistura, menor será sua densidade aparente e melhor será a produtividade de aplicação do material em serviço.

2.6.2 Propriedades da argamassa no estado endurecido

Dentre as propriedades mais relevantes para uma argamassa de revestimento no estado endurecido, estão a densidade, a resistência mecânica, a absorção de água e módulo de elasticidade. A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece requisitos para essas propriedades apresentadas por argamassas de revestimento de paredes e tetos, e ainda classifica-as.

2.6.2.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A densidade de massa pode ser definida como sendo a relação entre a massa e o volume aparente da argamassa. Carasek (2010) destaca que a massa específica da argamassa endurecida é um pouco menor do que o valor no estado fresco, devido à saída de parte da água. Os corpos de prova cilíndricos de argamassa endurecida, seca ao ar e seca em estufa, reduzem cerca de 7% e 9%, respectivamente, em relação ao valor inicial, no estado fresco. É observada uma relação direta entre o teor de água da argamassa e a redução da densidade de massa com a secagem.

A densidade de massa no estado endurecido é determinada seguindo as orientações apresentadas pela norma NBR 13280 (ABNT, 2005). Sendo as argamassas classificadas a partir da sua densidade de massa no estado endurecido, conforme apresentado na Tabela 2.6.

Tabela 2-6 - Classificação das argamassas em função da densidade de massa no estado endurecido

Classe	Densidade de massa no estado endurecido kg/m ³	Método de ensaio
M1	≤ 1 200	
M2	1 000 a 1 400	
M3	1 200 a 1 600	
M4	1 400 a 1 800	ABNT NBR 13280
M5	1 600 a 2 000	
M6	> 1 800	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

2.6.2.2 Resistência à compressão e a tração na flexão

A resistência mecânica das argamassas representa uma importante propriedade a ser analisada no desempenho de materiais, ela diz respeito à propriedade das argamassas de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduz em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento. Esforços como o desgaste superficial, impactos, movimentação térmica ou movimentação higroscópica são exemplos de solicitações que exigem resistência mecânica, pois geram tensões internas que tendem a desagregá-los (CARASEK, 2010).

As argamassas destinadas ao revestimento de paredes e tetos devem cumprir com os requisitos estabelecidos em norma. As argamassas são classificadas a partir da sua resistência a compressão e a tração na flexão, conforme apresentado nas Tabelas 2.7 e 2.8.

Tabela 2-7 Classificação das argamassas em função da resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão MPa	Método de ensaio
P1	$\leq 2,0$	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	$> 8,0$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 2-8 Classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão MPa	Método de ensaio
R1	$\leq 1,5$	ABNT NBR 13279
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	$> 3,5$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

2.6.2.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O revestimento de argamassa deve também apresentar capacidade de absorver pequenas deformações, para se deformar sem ruptura ou por meio de microfissuras, de maneira a não comprometer a sua aderência, estanqueidade e durabilidade (CARASEK, 2010). Essa complexa propriedade está associada ao módulo de elasticidade e à resistência mecânica das argamassas e influenciará tanto na fissuração como na aderência dos revestimentos.

2.6.2.4 Coeficiente de capilaridade

A permeabilidade à água é a propriedade que está relacionada com a função de estanqueidade da parede, muito importante quando se trata de revestimentos de fachada. Esse atributo é primordial quando o edifício está situado em região de alto índice de precipitação pluviométrica, pois o revestimento tem como função proteger o edifício da infiltração de água. Caso contrário, a umidade infiltrada pelas paredes causará problemas que comprometem tanto a higiene e a saúde dos usuários, como a estética do edifício, além de estar associada às manifestações patológicas como eflorescências, descolamentos e manchas de bolor e mofo (CARASEK, 2010).

A norma NBR 15259 (ABNT, 2005) apresenta um método para determinação do coeficiente de capilaridade. As argamassas de revestimento são classificadas a partir do coeficiente de capilaridade conforme apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2-9 Classificação das argamassas em função do coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade g/dm ² .min ^{1/2}	Método de ensaio
C1	≤ 1,5	
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	ABNT NBR 15259
C5	5,0 a 10,0	
C6	> 10,0	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e o procedimento experimental adotado para se realizar a pesquisa. O procedimento experimental da pesquisa foi dividido em três etapas conforme a Figura 3.1.

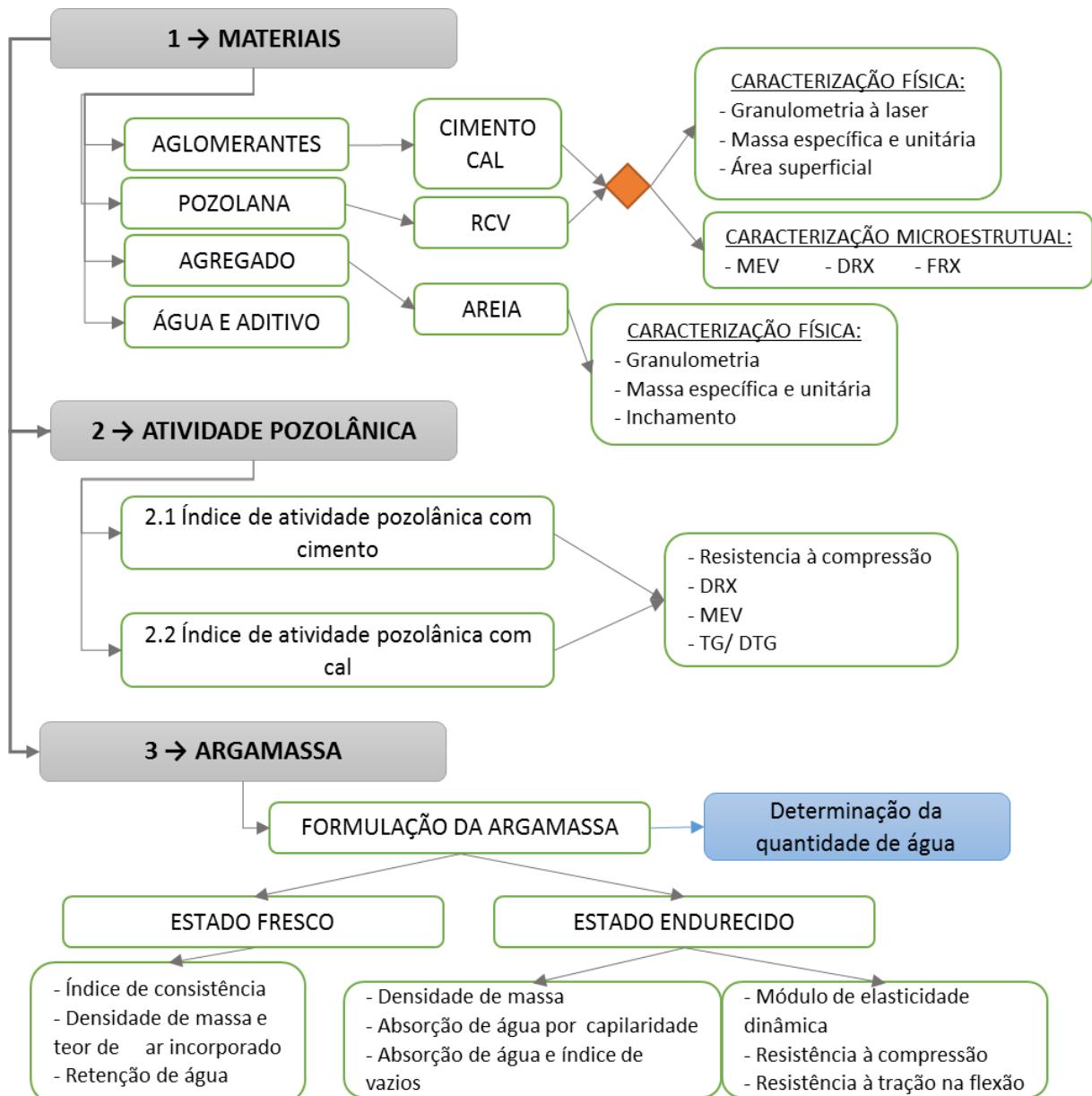


Figura 3-1 - Planejamento experimental da pesquisa

3.1 Materiais

A seguir serão descritos os materiais utilizados na confecção das argamassas objeto de estudo desta pesquisa.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland CP V ARI-RS, da marca Mizu, de um mesmo lote. O tipo de cimento foi escolhido em função da ausência de pozolana em sua composição e menores quantidades de adições entre os cimentos comercializados na região, permitindo uma melhor avaliação da influência do RCV na matriz cimentícia da argamassa.

A caracterização Química, Física, e Mecânica do cimento foram obtidas a partir dos boletins técnicos fornecidos pelo fabricante. A massa específica e massa unitária foram obtidas através de ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFRN conforme as normas NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 45, (ABNT, 2006).

3.1.2 Resíduo da indústria de cerâmica vermelha

O resíduo da indústria de cerâmica vermelha após o beneficiamento descrito abaixo foi incorporado como substituição parcial ao cimento Portland em teores de 0, 10, 20 e 30%.

3.1.2.1 Beneficiamento do resíduo de cerâmica vermelha (RCV)

O resíduo de cerâmica vermelha é proveniente de uma empresa privada do ramo de refratários de argila, localizada no município de Currais Novos/RN. A escolha da empresa foi feita em virtude da acessibilidade para aquisição do RCV e da reconhecida qualidade de seus refratários.

O RCV tem como composição peças de telhas cerâmicas não aprovadas no controle de qualidade para comercialização, seja por falha na queima, defeitos dimensionais ou falta de integridade da peça causada por manuseio indevido ou fragilidade intrínseca.

O resíduo foi colhido na empresa em peças de variados tamanhos, desde cacos até peças de telha quase inteira. Estas foram quebradas com marreta em cacos de aproximadamente 3 cm de comprimento, como apresentado na Figura 3-2 a). Este procedimento foi realizado a fim de homogeneizar o material para a próxima etapa de refinamento, que foi a diminuição da granulometria no equipamento de abrasão Los Angeles. Na Figura 3-2 b) é ilustrado a aparência do material obtido no final do processo de cominuição.



Figura 3-2 - Material antes (a) e após moagem (b)

Por vez, foram moídos 5 kg de resíduo durante 20 min com uma carga abrasiva de 16 esferas (48 mm de diâmetro). A partir desse procedimento obteve-se um material com granulometria de agregado miúdo que foi passado na peneira 4.8 mm, para então ser levado ao moinho de bolas.

Usando-se o jarro de cerâmica do moinho de bolas com capacidade de 5L. Este foi preenchido em 55% do seu volume com bolas de alumina de tamanhos variados. No teste inicial o moinho de bolas foi ligado por 8h, obtendo-se um material com pouco mais de 30% da massa retida na peneira N° 200.

O processo de peneiramento foi considerado inviável por conta do excessivo tempo demandado nesta fase em virtude da leveza, finura e higroscopia do material. Em função disso, foi realizado uma moagem de 15 horas sendo em seguida feita uma granulometria a laser para verificar a finura do material e a eficiência do processo. Dessa forma, padronizou-se o processo de cominuição do resíduo. Após este processo o material foi seco em estufa por 24 h com temperatura de 110° C e

guardado em recipientes fechados. Na Figura 3.3 tem-se o fluxograma do processo de beneficiamento do RCV.



Figura 3-3 Fluxograma do beneficiamento do RCV

3.1.3 Cal hidratada

A cal hidratada utilizada como plastificante da argamassa mista foi a CH – I da marca Carbomil. Na produção das argamassas, a cal passou pelo processo de maturação, atendendo aos procedimentos orientados pela norma NBR 13276 (ABNT, 2005).

3.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado é proveniente de leito de rio, disponível para aquisição no comércio local. Para sua caracterização foram realizados os ensaios de granulometria pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), inchamento pela norma NBR 6467 (ABNT, 2006), massa específica real pela norma NBR 9776 (ABNT, 1987) e massa unitária pela norma NBR NM 45 (ABNT, 2005).

Este material foi adquirido como areia média e para a utilização na argamassa, sendo usada a fração passante na peneira 2.4 mm, tendo em vista a granulometria adequada para fabricação de argamassas de revestimento do tipo emboço ou massa única.

3.1.5 Aditivo e água

Foi utilizado o aditivo superplastificante da marca BASF dosado em 2% sobre a massa dos materiais reativos. Esse aditivo foi diluído na água de amassamento. Usou-se água potável e oriunda da rede abastecimento local.

3.2 Métodos

3.2.1 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

Esse parâmetro foi obtido conforme recomendações da norma NBR 5752 (ABNT, 2014). O aditivo utilizado foi o superplastificante da marca BASF, dosado em 2 % sobre a massa dos materiais aglomerantes. Este foi previamente dissolvido na água de amassamento da argamassa.

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias é calculado pela seguinte equação:

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100$$

Onde:

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento e 25 % de material pozolânico (argamassa B) expressa em MPa;

f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento (argamassa A) expressa em MPa.

3.2.2 Índice de atividade pozolânica com cal

Foi realizado de acordo com a norma NBR 5751 (ABNT, 2012), inicialmente foi feito o proporcionamento dos materiais, o qual estabelece que a argamassa deve conter uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponde ao dobro do volume de hidróxido de cálcio.

Para moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, devem-se utilizar as seguintes quantidades, em massa, dos materiais conforme Tabela 3.1.

Tabela 3-1 - Quantitativo dos materiais

Material	Massa
- hidróxido de cálcio	104 g;
- areia normal	234 g de cada uma das quarto frações
- material pozolânico	$m_{poz} = 2 \times \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \times 104$, em gramas (g);

Onde δ_{poz} e δ_{cal} são, respectivamente, os valores das massas específicas do material pozolânico e da cal hidratada, determinados de acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2000)

3.2.3 Análise química (FRX)

O conhecimento da composição química do RCV permitirá verificar se este material se adequa aos requisitos químicos que a norma NBR12653 (ABNT, 2014) prescreve para materiais pozolânicos. A análise química FRX foi desenvolvida por fluorescência de raios X utilizando o espectrômetro por fluorescência de raios X do tipo EDX – 720, Shimadzu, em uma atmosfera a vácuo e desenvolvido o método semi-quantitativo para a determinação dos elementos em termos de óxidos.

3.2.4 Análise Mineralógica (DRX)

Para identificação das fases presentes no RCV e nas argamassas, foram realizadas análises mineralógicas por Difração de raios X, utilizando-se radiação Cu – $K\alpha$, com tensão acelerada 40 kV e corrente de 30 mA, com varredura de 2θ de 5° a 80° e velocidade de 5°/min. O equipamento utilizado era da marca Shimadzu modelo XRD – 7000.

3.2.5 Análise microscópica (MEV)

A análise microscópica foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), de forma a se obter a morfologia do RCV e da superfície de ruptura das argamassas oriundos do ensaio de índice de atividade pozolânica. As micrografias foram obtidas em equipamento da marca Hitachi modelo TM-3000.

3.2.6 Análise de área superficial específica (BET)

O ensaio de análise de área superficial específica foi realizado pelo método BET para os materiais aglomerantes utilizados na pesquisa com o intuito de conhecer sua área superficial e assim poder traçar comparativos entre os resultados em função da superfície de reação de cada material. Este procedimento foi realizado no equipamento BEL JAPAN modelo BELSORP-mini II, onde se utiliza dados referentes à adsorção física de um gás, nesse caso o nitrogênio, e equações provenientes do

processo de adsorção identificado pelo procedimento BET o qual fornece como resultado a área superficial específica do material.

3.2.7 Análise granulométrica a laser

As análises de granulometria a laser foram realizadas no granulômetro a laser CILAS modelo 920 líquido para os materiais aglomerantes utilizados na pesquisa. Este procedimento tem por fim obter dados quanto à distribuição e tamanho de partículas de materiais finos ($D<500\mu m$).

3.2.8 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

A análise termogravimétrica foi realizada para investigação da atividade pozolânica a partir da quantificação da perda de massa de hidróxido de cálcio das argamassas oriundas do ensaio de atividade pozolânica com cimento e com cal. Sabe-se que a quantidade de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia diminui substancialmente de acordo com a evolução da reação pozolânicas ao longo do tempo. O equipamento utilizado para a análise térmica foi o Analisador termogravimétrico e calorímetro simultâneo - Modelo: SDTQ600 da fábrica TA Instruments.

Todos os ensaios foram realizados obedecendo os seguintes parâmetros: Tipo de cadiño: Alumina; Gás de purga: Nitrogênio; Vazão do gás de purga: 50mL/min; Razão de aquecimento: 10°C/min; Temperatura final: 900°C e massa da amostra de aproximadamente 10mg.

3.2.9 Análise granulométrica do agregado miúdo

A Análise granulométrica do agregado miúdo foi realizada conforme procedimento da norma NBR 248 (ABNT, 2003), a qual descreve o método de determinação da composição granulométrica. Esse método de análise visa classificar as partículas de uma amostra pelos respectivos tamanhos e medir as frações correspondentes a cada tamanho. Uma curva granulométrica adequada permite um melhor empacotamento dos grãos de agregados, com isso é possível reduzir vazios e melhorar a interface pasta agregado. Essa caracterização fornece a determinação do módulo de finura e dimensão máxima característica.

3.2.10 Massa específica dos materiais

Os ensaios para determinação da massa específica dos agregados foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN através do procedimento descrito na norma NBR NM 52 (ABNT, 2003), esta norma descreve o procedimento para determinação de massa específica e massa específica aparente. A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros permeáveis à água.

Para os aglomerantes, cimento Portland, RCV e a cal hidratada, a massa específica foi obtida seguindo a norma NBR NM 23 (ABNT, 2009). Esses dados são indispensáveis para o quantitativo em massa dos materiais componentes do traço.

3.2.11 Massa unitária dos materiais

A massa unitária de um agregado é a relação entre sua massa e seu volume sem compactar, considerando-se também os vazios entre os grãos. É utilizada para transformar massa em volume e vice-versa. Esta propriedade foi determinada para os agregados miúdos por meio da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), a qual discorre sobre determinação da massa unitária e volume de vazios.

3.2.12 Definição do traço

A argamassa utilizada neste estudo experimental foi uma argamassa mista utilizada no revestimento de paredes e tetos, com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia) em volume combinado com massa. O traço escolhido é comumente empregado em obras e recomendado por Carasek (2010).

3.2.13 Formulação das argamassas

As argamassas utilizadas neste estudo experimental foram confeccionadas a partir da substituição de diferentes teores de cimento Portland pelo resíduo de cerâmica vermelha (RCV). Como mostrado na Tabela 3.2, foram formuladas 4 argamassas com teores de substituição de 0%, 10%, 20% e 30%.

Tabela 3-2 Nomenclatura dos traços em volume e massa

Traço em Volume (cimento:RCV:cal:areia)	Traço em Massa (cimento:RCV:cal:areia)	Teor de resíduo (%)	Nomenclatura
1 : 0,0 : 1 : 6	1 : 0 : 0,42 : 6,66	0	REF
1 : 0,11 : 1,11 : 6,67	1 : 0,11 : 0,47 : 7,40	10	SUB10
1 : 0,25 : 1,25 : 7,5	1 : 0,25 : 0,53 : 8,33	20	SUB20
1 : 0,43 : 1,43 : 8,57	1 : 0,43 : 0,60 : 9,51	30	SUB30

Esses teores foram escolhidos com base em pesquisas que utilizaram pozolanas na forma de resíduos cerâmicos em substituição do CP, a exemplo de Schackow *et al.* (2015), que sugeriram que a substituição de 23-30% de cimento Portland poderia ser alcançada sem nenhum dano significativo às propriedades tecnológicas. A argamassa com teor de 0% é considerada a argamassa de referência (REF), a qual servirá como parâmetro comparativo para as argamassas SUB10, SUB20 E SUB30.

Foi feito a determinação da quantidade de água necessária para a produção das argamassas, segundo procedimento prescrito pela norma NBR 13276 (ABNT, 2005), a qual descreve o método de preparo da mistura e determinação do índice de consistência de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Foi adotado o valor do índice de consistência recomendado pela mesma norma de 260 ± 5 mm para todos os 4 traços.

Após encontrar a água necessária pelo ensaio de índice de consistência foi feito os quantitativos de materiais com base na quantidade de corpos de prova necessários para análise dos resultados.

3.2.13.1 Mistura das argamassas

No processo de mistura foi utilizado um misturador mecânico de eixo vertical com capacidade de 3 litros. A cal foi maturada durante 24 antes da mistura junto com a areia. Os materiais aglomerantes hidráulicos (CP e RCV) foram homeogeneizados em depósito fechado no estado seco antes de serem adicionados na cuba. As formas foram previamente untadas com desmoldante a base de óleo mineral, sendo

adensadas e em seguida cobertas com vidro para evitar a evaporação excessiva após a moldagem.sendo moldados para cada ensaios 6 corpos de prova de cada traço com formato prismático medido 4 x 4 x16 cm de acordo com o estabelecido pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.2.14 Ensaios da argamassa no estado fresco

Nos próximos três subitens serão mencionados os ensaios realizados na argamassa de traço 1:1:6 no estado fresco para os teores de substituição do CP por RCV em 0, 10, 20 e 30% em massa.

3.2.14.1 Índice de consistência

Para a determinação do índice de consistência, foi realizado o procedimento descrito na norma NBR 13276 (ABNT, 2005), a qual descreve o método de preparo da mistura e determinação do índice de consistência para argamassa empregadas no assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos.

3.2.14.2 Densidade de Massa no Estado Fresco e teor de ar incorporado

O procedimento experimental para o desenvolvimento deste ensaio está descrito na norma NBR 13278 (ABNT, 2005), que descreve o método de determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado em argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

3.2.14.3 Retenção de água

Para a realização deste ensaio, foram seguidos os procedimentos previstos na norma NBR 13277 (ABNT, 1995), no qual determina-se a retenção de água das argamassas com base massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro.

3.2.15 Ensaios da argamassa no estado endurecido

Para os ensaios realizados no estado endurecido foram moldados corpos de prova prismáticos medido 4 x 4 x16 cm de acordo com o procedimentos estabelecido na norma NBR 13279 (ABNT, 2005). No processo de mistura foi utilizado um misturador mecânico de eixo vertical com capacidade de 3 litros. As formas foram

previamente untadas com desmoldante a base de óleo mineral, e em seguida cobertas com vidro para evitar a evaporação excessiva da água de amassamento. Após 48h os corpos de prova foram desmoldados e submetidos a cura ao ar livre de modo a proporcionar a carbonatação da cal.

3.2.15.1 Resistência à compressão e a tração na flexão

A resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas foi determinada em corpos de prova nas idades de 7 e 28 dias, conforme procedimento descrito na norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, os corpos de prova foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento, sendo previamente efetuadas marcações do eixo central dos corpos de prova para correto posicionamento. E em seguida, foi aplicada uma carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova.

Para o ensaios de resistência à compressão foi usada a metade de cada espécime resultante do ensaio anterior (Figura 3.4) submetidos a uma carga de (500 ± 10) N/s delimitados a uma área de 40 x 40mm.



Figura 3.4 – Espécimes para ensaio de resistência à compressão

3.2.15.2 Densidade de Massa no Estado Endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi realizado aos 7 e 28 dias, seguindo a prescrição da norma NBR 13280 (ABNT, 2005) a qual prescreve o método de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido para argamassa de assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos.

3.2.15.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Com o intuito de conhecer o comportamento da argamassa produzida com substituição do cimento por RCV foi avaliada a permeabilidade do compósito e volume de poros permeáveis conforme ensaio prescrito na norma NBR 9778 (ABNT, 2009) a qual descreve o método para determinação absorção de água, índice de vazios e massa específica para argamassa e concreto endurecidos.

3.2.15.4 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada em 3 corpos de prova prismáticos medindo 4 x 4 x 16 cm para cada traço estudado aos 28 dias de idade, seguindo-se o método prescrito pela norma NBR 15259 (ABNT, 2005).

3.2.15.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade das argamassas foi realizado conforme as prescrições da norma NBR 15630 (ABNT, 2009), está norma descreve o método de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. O ensaio foi realizado em três corpos de prova medindo 4 cm x 4 cm x 16 cm preparados conforme a norma NBR 13279 (ABNT, 2005) com 28 dias de idade. Para o ensaio foi utilizado o equipamento TICO - Ultrasonic Testing Instrument da marca Proceq.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Caracterização dos materiais

A seguir será apresentado a caracterização física e química dos materiais utilizados na pesquisa de forma a conhecer o comportamento e possíveis influências nas argamassas de revestimentos que virão a ser incorporados.

4.1.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo em argamassas tem função de enchimento e afeta várias propriedade no estado fresco e endurecido, inclusive o módulo de elasticidade do material. Na Figura 4.1, tem-se a curva granulométrica do agregado miúdo destinado à produção das argamassas.

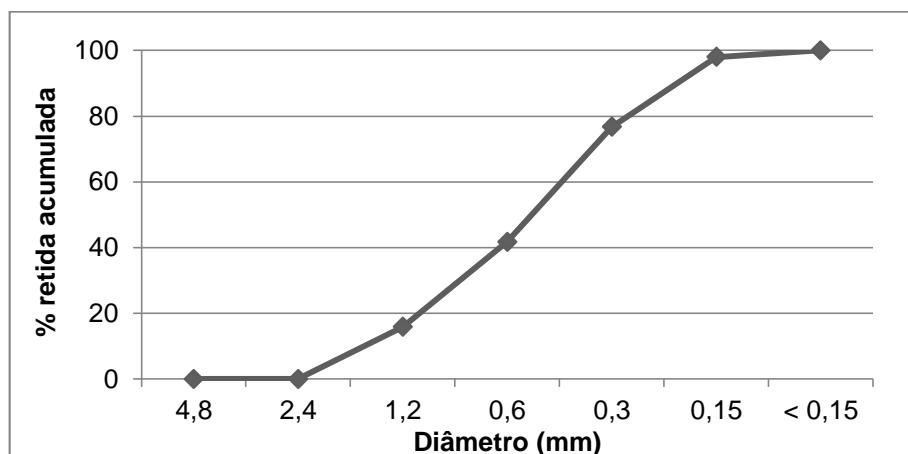


Figura 4-1 - Curva granulométrica do agregado miúdo

De acordo com a Figura 4.1 percebe-se que o agregado miúdo apresenta perfil granulométrico contínuo e sem excesso de materiais finos. O que o torna um adequado material para produção das argamassas, já que agregados miúdos com perfis granulométricos uniformes ou abertos comprometem a compacidade e empacotamento do material, o que pode acarretar em resistência abaixo do adequado para o emprego da argamassa. Carasek (2010) cita que a areia atua como um esqueleto sólido que evita parte das variações volumétricas por secagem e o risco da fissuração subsequente. Quantidades excessivas de materiais pulverulentos

(passante na peneira 150 μm) diminuem a consistência no estado fresco e aumentam a retração hidráulica excessiva no estado endurecido.

Na Tabela 4.1 apresenta-se as características físicas do agregado miúdo. Observa-se que as massas específica e unitária estão dentro dos limites previstos para aplicação em compósitos de peso normal.

Tabela 4-1 - Caracterização física do agregado miúdo

Módulo de Finura	2,32 (zona ótima)	NM 248:2003
Massa específica (kg/m³)	2590	NM 52:2009
Massa unitária (kg/m³)	1550	NM 45:2006
Dimensão maxima característica (mm)	2,4	NM 248:2003

Na Figura 4.2 tem-se a curva de inchamento do agregado miúdo. Esse ensaio foi realizado com o intuito de proporcionar a conversão do traço de volume para massa, tendo em vista que é preciso considerar o volume aparente da areia devido a umidade.

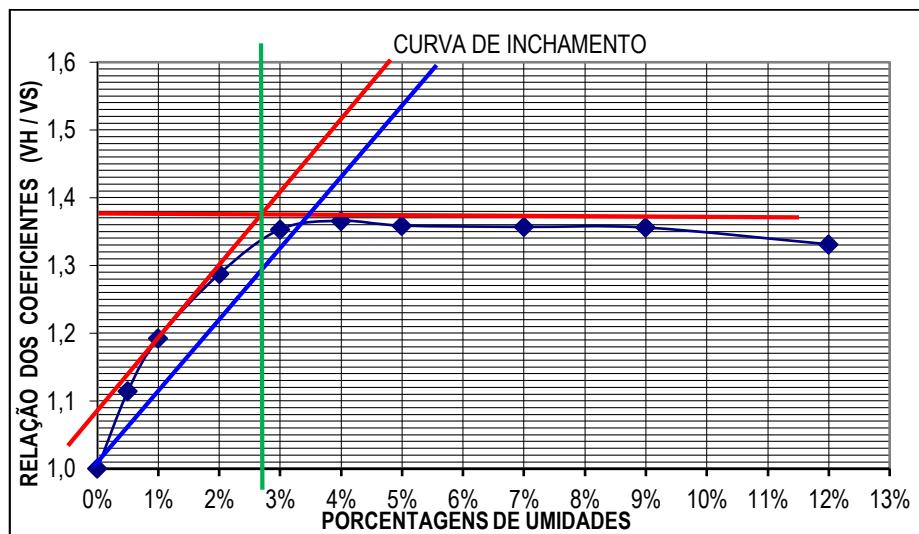


Figura 4-2 - Curva do ensaio de inchamento do agregado miúdo

De acordo com a Figura 4.2 observa-se que o coeficiente de inchamento foi de 1,36% e a umidade crítica de 2,8%. Esses dados foram utilizados na conversão do traço de volume para massa do agregado miúdo.

4.1.2 Caracterização dos materiais cimentantes e Investigação da reatividade do RCV

Este item se destina a apresentar os resultados e discussões acerca dos três materiais reativos/aglomerantes (cal hidráulica, cimento Portland e RCV) envolvidos nos ensaios e argamassas produzidas.

4.1.2.1 Caracterização do cimento Portland

Na tabela 4.2 estão descritas as propriedades físicas e química do cimento CP V ARI RS utilizado na formulação das argamassas.

Tabela 4-2 Ensaios químicos e físicos do cimento CP V ARI RS

Características e propriedades	Valores	Desvio Padrão	ABNT
Composição Química	Perda ao fogo	4,27%	0,2
	Resíduo insolúvel	0,74%	0,24
	SO ₃	3,16%	0,14
	CaO livre	2,01%	0,33
Resistencia à compressão	1 dia	19,26 MPa	0,82
	3 dias	29,69 MPa	0,92
	7 dias	37,95 MPa	0,9
	28 dias	46,38 MPa	0,91
Finura	Massa Especifica	3,06 g/cm ³	0,01
	Blaine	4350,96 cm ² /g	86,87
	# 325	3,42 %	0,47
	# 200	0,61 %	0,17
Expansibilidade	Quente	1,92 mm	0,2
Pega	Ínicio	103,96 min	2,94
	Fim	157,08 min	7,21
Consit.	Normal	28,11%	0,13

Fonte: Informações do fabricante conforme boletim técnico (maio/2015).

4.1.2.2 Caracterização da cal hidratada

Na Tabela 4.3 são apresentadas características químicas, físicas e granulométricas da cal hidratada CH-I fornecidas pelo fabricante. Segundo o boletim, a matéria prima é de origem sedimentar marinha, sendo tal constituída por carbonato

de cálcio natural cretáceo com textura microcristalina romboética, possuindo densidade de 2,7 g/cm³ e dureza Mohs igual a 3.

Tabela 4-3 Propriedades química e físicas da cal hidratada CH – I

Composição Química		Características Físicas	
PPC:	≤ 25,0%	Umidade: ≤ 2,0%	
CaCO ₃ :	≤ 70,0%	Densidade Aparente: 0,55 - 0,65 g/cm ³	
Ca(OH)2d:	≥ 90,0%		
MgO:	≤ 3,5%		
RI:	≤ 0,5%		
SIO ₂ :	≤ 0,3%	Distribuição Granulométrica	
R ₂ O ₃ :	≤ 1,5%	Retenção na # 325: ≤ 1,5 %	
Pureza:	≥ 92,5%		
OTNBV:	≥ 90,0%		

Fonte: Boletins técnicos fornecido pelo fabricante (Dez, 2016)

4.1.2.3 Granulometria, densidade e área superficial específica dos materiais aglomerantes

Na Figura 4.3 são mostrados as curvas granulométricas da cal hidratada, cimento Portland e RCV obtidas através da granulometria a laser. Os diâmetros médios obtidos foram 5,40 µm, 9,50 µm e 6,12 µm, respectivamente. Todos os aglomerantes exibem perfis de distribuição das partículas semelhantes, sugerindo que o tempo e forma de moagem do RCV foram eficientes para reproduzir a finura dos demais aglomerantes.

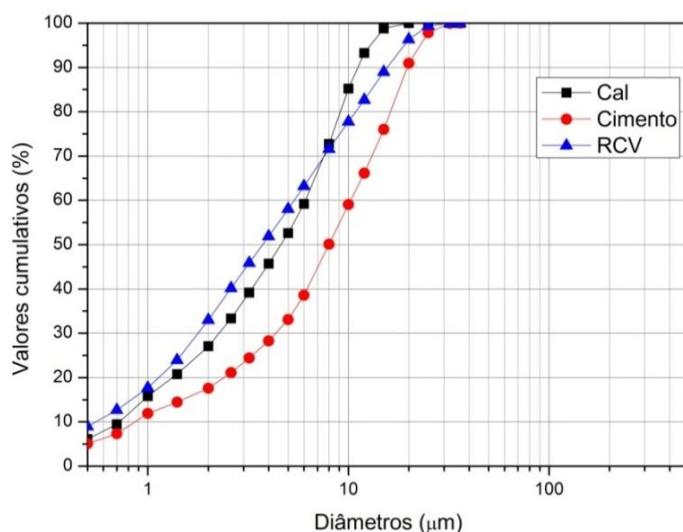


Figura 4-3 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes

Na Tabela 4.4 apresenta-se os diâmetros obtidos para o volume de partículas acumulado de 10%, 50% e 90% dos aglomerantes obtidos na análise granulométrica.

Tabela 4-4 Resultado das faixas da granulometria à laser dos aglomerantes

Resultado para Faixa : 0.10 µm - 500.00 µm		
	RCV	CP
Diâmetro a 10%	0.55 µm	0.86 µm
Diâmetro a 50%	3.73 µm	7.98 µm
Diâmetro a 90%	15.61 µm	19.64 µm
Diâmetro médio	6.12 µm	9.50 µm

Constata-se que para todos os volumes acumulados, o RCV apresenta um diâmetro menor do que o cimento Portland. Celik (2009) concluiu que a melhor distribuição de tamanho de um cimento deve ser contínua e que uma maior distribuição de tamanho de partícula aumenta a densidade de empacotamento e diminui a demanda de água, enquanto uma distribuição de tamanho de partícula mais estreita gera maiores taxas de hidratação para área de superfície específica igual. Embora o diâmetro correspondente a 90% do volume acumulado de partículas do RCV (15.61 µm) seja menor que o apresentado pelo CP (19.64 µm), O CP apresenta uma distribuição de tamanho de partículas mais contínua.

De acordo com o perfil granulométrico apresentado na Figura 4.3 verifica-se que o RCV cominuído não possui partículas maiores que 36µm. Isto satisfaz o requisito de finura para pozolanas das normas NBR 12653 (ABNT, 2014) e C 618, (ASTM, 2012), as quais especificam que o material pozolânico deve possuir menos que 20% e 34% do volume de partículas retidas na peneira de 325mesh (45µm), respectivamente. Esses requisitos normatizados têm por objetivo garantir que os materiais apresentem finura adequada para o emprego como pozolana. Assegurando assim, que o material seja reativo, formando produtos de hidratação e assegure a densificação da matriz cimentícia, restringindo a penetração de agentes agressivos e difusão de íons deletérios.

Pode-se observar na Figura 4.4, onde o perfil granulométrico do cimento é sobreposto à curva do RCV, que a faixa dos diâmetros das partículas do cimento está dentro do intervalo para a granulometria do resíduo cerâmico.

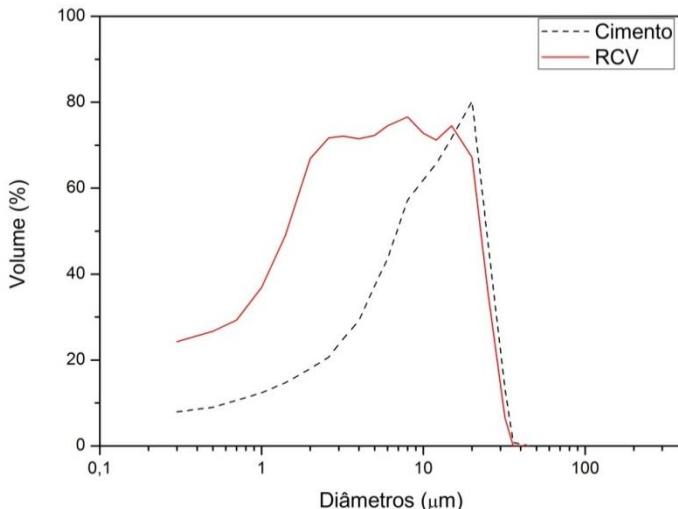


Figura 4-4 - Perfil granulométrico do RCV e CP

Analizando a Figura 4.4 observa-se que o RCV apresenta um volume maior de partículas menores que 5 μm , quando comparado com o cimento, resultando em uma capacidade de preenchimento do RCV maior que o CP. Tal condição resulta em uma maior compacidade dos compósitos produzidos com RCV quando comparada a matriz cimentícia do cimento Portland. O perfil granulométrico do RCV mostra que o volume de partículas entre 2 e 20 μm se mantém constante e elevado, enquanto que a distribuição das partículas do cimento é contínua e a inclinação da sua curva granulométrica denota um grande intervalo de tamanho de partícula com até 19,64 μm , as quais representam 90% do volume.

Com os resultados discutidos, espera-se que ocorra a diminuição do tamanho dos poros da argamassa, conhecida como refinamento do tamanho de poros, assim como o refinamento do tamanho do grão. Esse efeito restringe o crescimento do hidróxido de cálcio (CH) que junto com sua diminuição em termos de quantidade, devido ao consumo na reação pozolânica, irá aumentar a resistência à ataque por sulfatos e carbonatação. Pois assim se terá CH de maior densidade e mais escondido, devido aos aglomerados de pozolanas ao seu redor, garantindo a integridade da matriz cimentícia, pois a suscetibilidade a agentes deletérios do CH advém da sua menor estabilidade quando comparado aos outros produtos de hidratação, este produto se dissolve quando em contato com sulfatos e umidade.

As massas unitária e específica e área superficial dos materiais são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4-5 - Caracterização física dos materiais aglomerantes

Materiais	Massa Unitária (g/cm³)	Massa Específica (g/cm³)	Área superficial específica
Cimento	1,00	3,05	1,15 m ² /g
RCV	0,71	2,75	2,11 m ² /g
Cal hidratada	0,41	2,19	6,74 m ² /g

Os resultados de massa unitária e específica obtidos para o cimento Portland e cal são compatíveis com os fornecidos pelos boletins técnicos dos fabricantes. Percebe-se que as massas unitárias e específicas do RCV são menores (0,71 g/cm³ e 2,75 g/cm³), quando comparados com o cimento, indicando a maior capacidade de preenchimento do RCV na matriz cimentícia para substituições feitas em massa.

Com relação à área superficial específica dos materiais, foi encontrado que o RCV possui área específica de 2,11 m²/g, valor maior que o cimento Portland. O que indica que a finura e área superficial das partículas do RCV podem resultar em uma maior reatividade e velocidade de reação dessa pozolana.

Com a área superficial específica maior e os grãos menores, a atividade pozolânica aumenta, uma vez que o pó entra na reação pozolânica com uma superfície de reação maior. Contudo, a fase amorfa do material é a sua característica mais importante no que diz respeito à atividade pozolânica (NAVRÁTILOVÁ, ROVNANÍKOVÁ, 2016).

4.1.2.4 Caracterização microscópica, composição química e mineralógica do RCV

A Tabela 4.6 indica a composição química em termos de óxidos para o RCV, cimento Portland e cal. Pode-se observar que o RCV contém significativas quantidades de óxidos hidráulicos, sendo 42% de SiO₂, 25% de Al₂O₃ e 23% de Fe₂O₃. Em menores quantidades a massa de RCV é composta 4% de MgO e 3% de K₂O.

Tabela 4-6 - Composição química dos aglomerantes (% em peso)

(%)	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	SrO	TiO ₂	Ca(OH) ₂
RCV	0,99	42,33	22,63	24,52	3,47	0,0	0,01	3,99	0,0	1,47	-
CP V – ARI	77,59	7,53	7,99	2,67	0,69	0,0	1,48	0,82	0,46	0,20	-
RS											
Cal CH - I	-	0,0	-	-	-	-	-	4,0	-	-	90-98

Para uma melhor visualização dos teores presentes no RCV e CP, as porcentagens de óxidos são apresentadas na Figura 4.5. O RCV possui valor desprezível de SO₃ e ausência de álcalis. O teor alcalino do resíduo cerâmico em estudo diverge com os resultados encontrados por outros autores Navrátilová e Rovnaníková (2016), Matias, Faria e Torres (2014), Li *et al.* (2016), Garcia *et al.* (2015), Torgal e Jalali (2009), Vieira, Souza e Monteiro (2004), Lavat, Trezza, Poggi (2009), Castro *et al.* (2017) e Barata e Angélica (2012). Este fato irá contribuir para uma melhor durabilidade dos compostos cimentícios produzidos com o resíduo, especialmente os concretos que são sujeitos à reação álcali-agregado. No caso das argamassas de revestimento, temos que ela será menos suscetível a expansão deletéria em virtude da ausência de óxido sulfúrico.

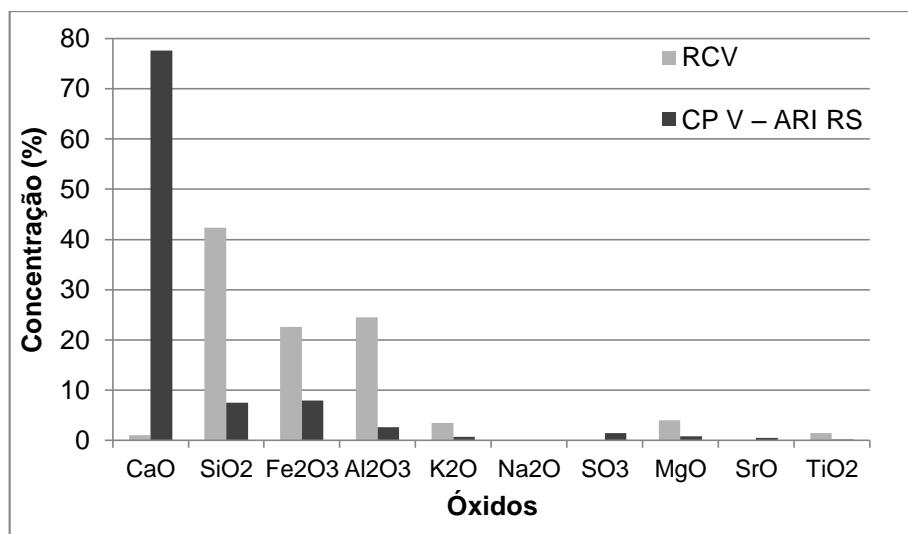


Figura 4-5 - Concentração dos óxidos nos aglomerantes

A soma dos componentes principais, SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, é de aproximadamente 90%, percentual acima do valor mínimo de 70%, requisitado para a composição química de pozolanas conforme as normas NBR 12653 (ABNT, 2014) e C 618 (ASTM, 2012), o que faz do RCV um resíduo potencial para uso como pozolana.

Na Figura 4.6 são mostradas as micrografias eletrônicas de varredura (MEV) da amostra de RCV. Pode ser observado na Figura 4.6 a) que a microestrutura é composta de grãos angulares e ásperos, onde se tem grãos bem maiores (diâmetro médio de 20 µm) cobertos de grãos bem menores, os quais emprestam uma aparência pulverulenta ao material. Isto poderá resultar em uma maior quantidade de água de amassamento na mistura de compósitos a base dele. Na Figura 4.6 b) tem-se a ampliação de 5000 vezes sobre uma partícula junto com sua análise em termo de elementos químicos que é apresentada na Figura 4.6 c).

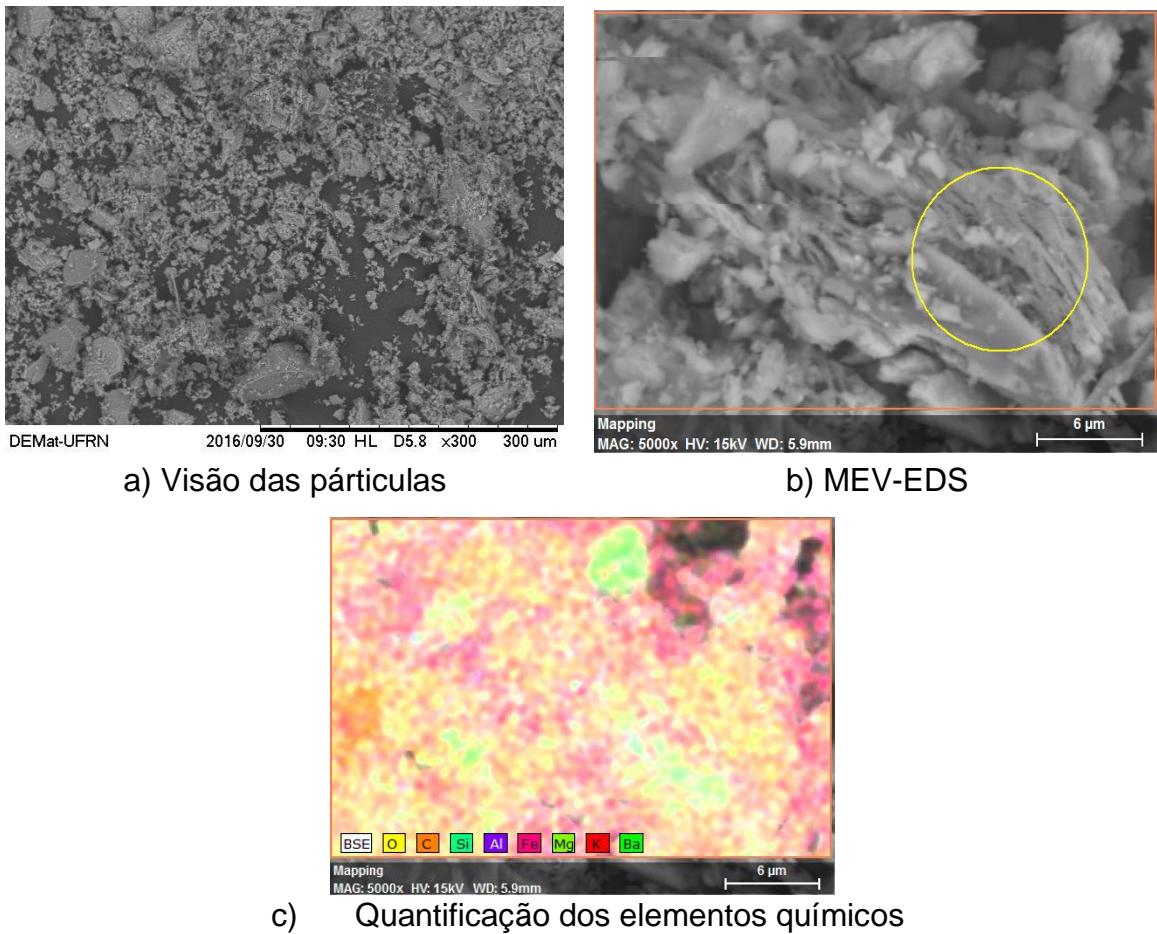


Figura 4-6 - Micrografias eletrônica de varredura do RCV

Na Figura 4.6 (b) observa-se o detalhe de uma partícula maior da amostra, a qual apresenta forma de lamelas sobrepostas. A análise MEV-EDS realizada na área circunscrita informa que a partícula é constituída predominantemente de oxigênio, silício, de alumínio e de ferro, o que pode indicar que a partícula pertence à família dos filossilicatos. Na Figura 4.6 c) observa-se a distribuição dos elementos químicos sobre toda a imagem analisada, indo além da área circunscrita na Figura 4.6 b).

Segundo Zhou e Keeling (2013), os filossilicatos são uma grande família de minerais que geralmente mostram estruturas em camadas. Os filossilicatos, principalmente compostos de sílica e alumina, apresentam uma atividade pozolânica acentuada quando calcinados e triturados. Se eles são bem tratados termicamente, esses minerais perdem sua cristalinidade e conseguem liberar sílica reativa e alumina levando a produção de CCS – (Compostos cimentícios suplementares) pelo consumo de Portlandita (MOHAMED, 2017).

4.1.2.5 Composição mineralógica do RCV

A composição mineralógica das fases cristalinas do RCV está ilustrada na Figura 4.7.

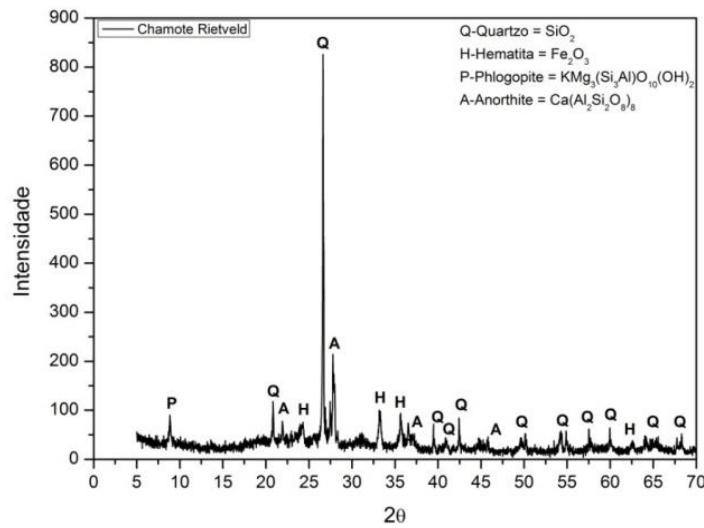


Figura 4-7 - DRX do resíduo de cerâmica vermelha (RCV)

O diagrama de difração de raios X apresentado na Figura 4.7 indica a baixa cristalinidade, menos de 150 cps, dos produtos queimados, exceto pelos picos pronunciados entre ângulos 2θ de 20-30°. A intensidade dos picos dos componentes é insuficiente como diagnóstico de material pozolânico devido aos seus diferentes graus de cristalinidade. Os picos predominantes detectados correspondem ao quartzo (Q), à anortita (A) e, em menor grau, hematita (H) e flogopita (P). A composição mineralógica encontrada é consistente e complementar com os resultados da análise FRX apresentando na Tabela 4.4, ratificando a presença de mica (flogopita) que conforme Bentayeb *et al.* (2003) é indicado pelo conteúdo de K_2O maior que 1,0%. Assim como, a anortita em função dos significativos teores de cálcio e magnésio.

A flogopita (P), composição química $KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$, é um mineral do grupo das micas, o qual faz parte da família dos filossilicatos. Está família conforme Mohammed (2017) possui os minerais com capacidade de pozolânica, como Ilita e Montmorillonita. A intensidade e abertura de pico da flogopita, na posição de 8° (2θ) podem indicar a baixa cristalinidade desse material, o que irá contribuir para sua reatividade, favorecendo a reação pozolânica do RCV.

4.1.2.6 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

São apresentados na Figura 4.8 os valores das resistências à compressão, obtidos para a argamassa SUB25, moldada com cimento e 25% de material pozolânico, e da argamassa REF moldada apenas com cimento, segundo as recomendações a norma NBR 5752 (ABNT,2014). Aos 7 dias de idade, a resistência à compressão da argamassa SUB25 foi 18,2% menor do que a argamassa REF.

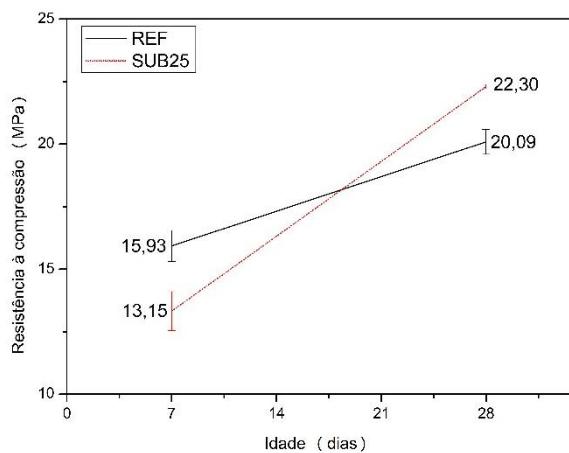


Figura 4-8 - Resistência à compressão das argamassas REF e SUB

A defasagem da resistência é proporcional à quantidade de cimento Portland substituído por RCV na argamassa. Uma vez que, conforme Mehta e Monteiro (2014), a reação pozolânica comparada à reação de hidratação do CP é lenta, assim, as taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência também são lentas. Entre 7 e 28 dias de idade a taxa de crescimento da resistência da argamassa SUB25 ultrapassa expressivamente a REF, resultando aos 28 dias em um índice de desempenho de 111%, conforme mostrada na Equação 4.1, em relação à argamassa de referência.

$$I_{cimento} = \frac{fcB}{fcA} \times 100 = 111\% > 90\% \quad \text{Equação (4.1)}$$

O valor da resistência à compressão para a argamassa com substituição foi superior a 11% da argamassa de referência (REF). Esta medida de índice de atividade pozolânica com o cimento Portland está de acordo às especificações das normas NBR 12653 (2014) e C 618 (ASTM, 2012). Portanto com a substituição de 25% de cimento Portland por resíduo cerâmico, há um aumento na resistência à compressão da argamassa devido ao efeito pozolânico do RCV.

4.1.2.7 Resultados do teste de difração de raios X (DRX)

Os padrões DRX para as argamassas de cimento *Portland* (REF) e com 25% de substituição de cimento por RCV (SUB25) estão ilustrados nas Figuras 4.9 e 4.10. Aos 7 dias de idade, na argamassa REF e SUB25, identifica-se um sutil pico de etringita na posição 9° em 2θ, que aos 28 dias desaparece em função da sua transformação em monossulfato.

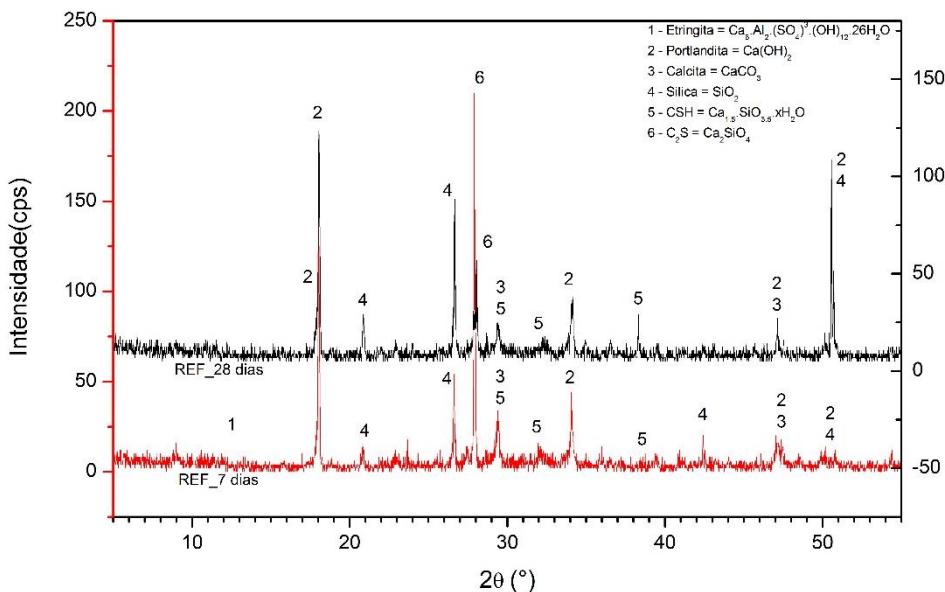


Figura 4-9 - DRX da argamassa de referência (REF) aos 7 e 28 dias

Na Figura 4.9, observa-se que a hidratação dos silicatos de cálcio pode ser confirmada pelo decréscimo do pico de C₂S (6) aos 28 dias. A fase C₂S (silicato dicálcico) no DRX da argamassa de referência (REF) indica a presença de grãos de clínquer não hidratados. A hidratação dessa fase é responsável pela formação de CSH. Com o decorrer da hidratação o pico de silicato dicálcico reduz juntamente com o aumento dos picos da fase CSH como pode ser observado aos 28 dias.

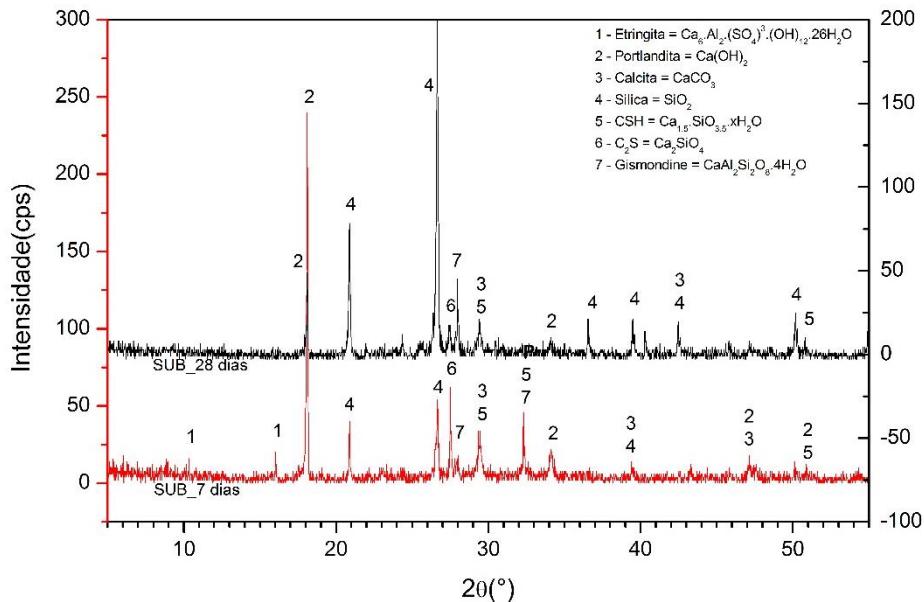


Figura 4-10 - DRX da argamassa com 25% de substituição (SUB25)

Na Figura 4.10, percebe-se que além das mesmas fases encontradas na argamassa de referência (REF), a argamassa SUB25 apresentou a formação de gismondina (7) ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) em todas as idades.

A gismondina (fase cristalina do Hidrato de Aluminossilicato de Cálcio, CASH) também foi encontrada por Oruji *et al.* (2017) em argamassas produzidas com cinza de carvão. A gismondina é um tipo de produto de hidratação termodinamicamente estável oriundo da reação pozolânica e poder ser precipitado à temperatura ambiente a partir da reação de C_2S ou C-S-H com o AH_3 liberado ou outro aluminato de cálcio no processo de hidratação (VICHAN, RACHAN, HORPIBULSUK, 2013). Houve um aumento da intensidade do pico de gismondina aos 28 dias, comparado aos 7 dias, o que indica que nesse período continuou havendo sua formação como resultado da atividade pozolânica. O crescimento da cadeia do composto de hidrato de aluminossilicato (CASH) pode levar ao desenvolvimento de uma microestrutura compacta, o que pode contribuir para alcançar a resistência nos compósitos cimentícios (ZHANG *et al.*, 2016).

Adicionalmente, para as argamassas SUB25 (Figura 4.10), observa-se que a intensidade do pico de Portlandita (2) aos 28 dias diminui devido ao consumo deste composto em consequência da reação pozolânica (Equação 4.2) do RCV. Em um DRX após 7 dias, os picos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tornam-se dominantes devido à cristalinidade de composto. A evolução do teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com o avanço da hidratação em cada amostra foi estimada a partir da intensidade.



A argamassa de referência - REF (Figura 4.9), apresenta em todas as idades maiores quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do que nas amostras contendo RCV (Figura 4.10). Isto é esperado e reforça a evidência da reação pozolânica.

A Figura 4.11 apresenta a comparação entre os DRX das argamassas SUB e REF com o intuito de elucidar a reação pozolânica. Lavat, Trezza, Poggi (2009) citam que a intensidade do pico quartzo aumenta em relação ao de portlandita, mostrando um máximo aos 28 dias o que é indicativo do desenvolvimento de hidratação de silicatos de cálcio resultado da reação junto com o consumo do hidróxido de cálcio. Tal afirmação é confirmada no difratogramma da argamassa SUB25 através diminuição da intensidade dos picos em 18° e 50° (2θ).

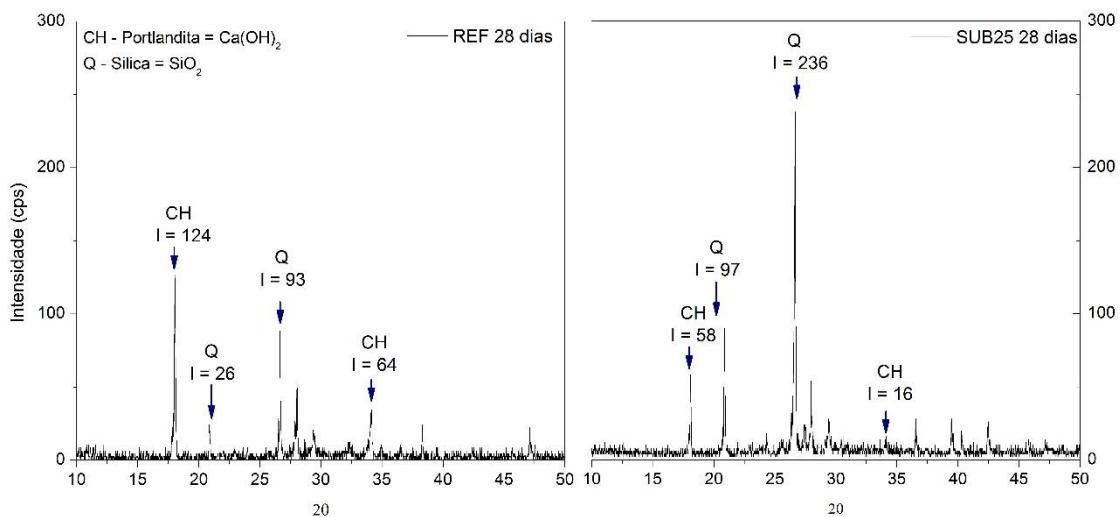


Figura 4-11 - Difratogrammas das argamassas REF e SUB25 aos 28 dias

Pode ser observado na Figura 4.11 que em misturas contendo 25% de RCV (SUB25), os picos de difração de quartzo são significativamente maiores do que os da mistura de CP (REF). Por outro lado, a quantidade de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na argamassa SUB25 foi menor do que na argamassa REF. Percebe-se também que a substituição de 25% de CP por RCV ocasiona a redução da intensidade do pico máximo de hidróxido de cálcio de 63 para 16 aos 28 dias e do pico secundário de 124 para 58.

4.1.2.8 Análise TG/DTG das argamassas de cimento

A Figura 4.12, apresenta os termogramas TG/DTG para as argamassas REF e SUB25 com 7 e 28 dias de cura.

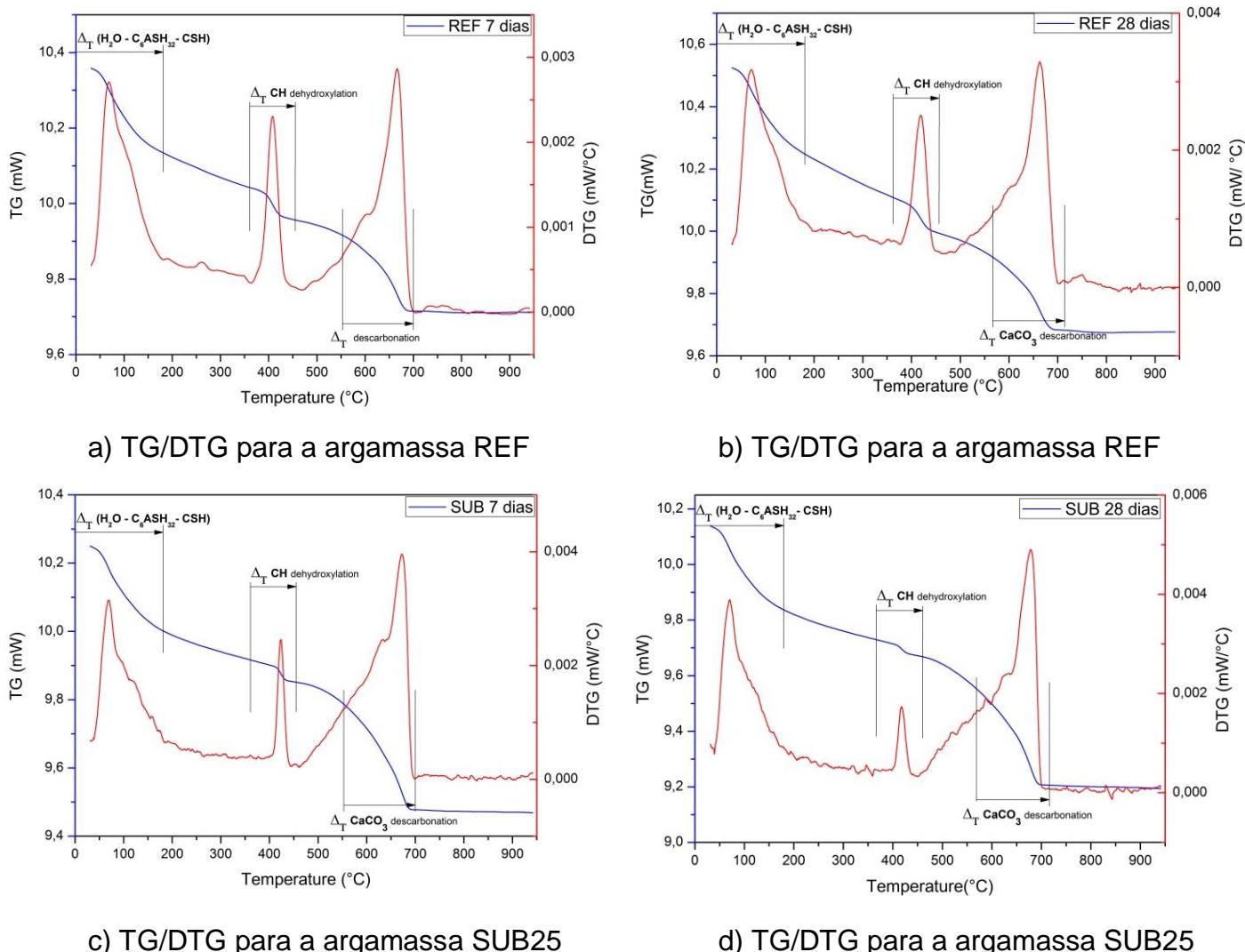


Figura 4-12 - Análise TG/DTG das argamassas REF e SUB25

Chikouche, Ghorbel, e Bibi (2016) citam em sua pesquisa que abaixo de 200 °C os picos de CSH, etringita e água quimicamente ligada se sobrepoem dificultando suas distinções. Este pico superposto detectado na curva DTG é acompanhado por uma perda de peso apresentada no TG similar tanto para a argamassa REF quanto para a SUB25. A cerca de 420°C foi detectado um pico endotérmico típico, correlacionado com a desidroxilação do hidróxido de cálcio que exibe uma tendência decrescente com o tempo de cura para as argamassas SUB25, conforme Figura 4.12 (c) e (d).

Finalmente, a cerca de 690 °C, as curvas termoanalíticas mostram o fenômeno endotérmico de descarbonatação devido a presença de carbonatos (CaCO_3) nas argamassas.

A Figura 4.13 mostra a perda de massa correspondente ao pico endotérmico do hidróxido de cálcio entre 400 e 450 °C nas argamassas oriundos do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento, sendo estas a de referência com 100% de cimento (REF) e a com 25% de material pozolânico (SUB).

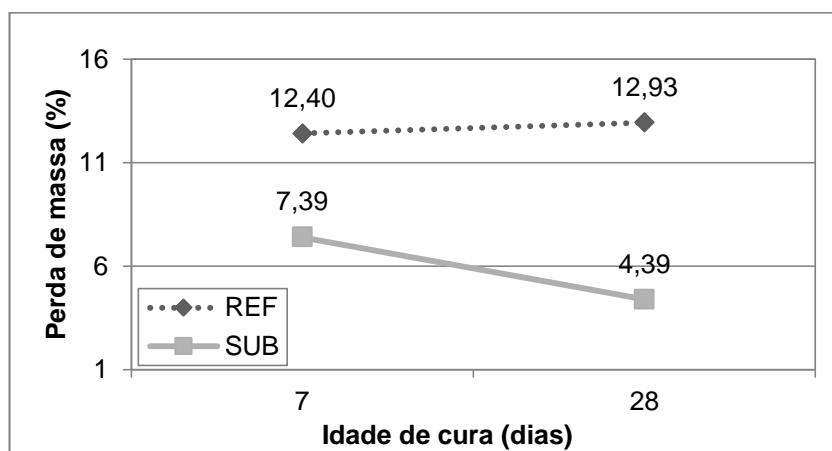


Figura 4-13 - Perda de massa (%) do CH detectados nas argamassas

Percebe-se ainda que a perda de massa correspondente a desidroxilação da portlandita é bem menor para todas as idades na argamassa SUB, o percentual de perda de massa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é 3 vezes menor do que o percentual da argamassa de referência, conforme Figura 4.13.

4.1.2.9 Índice de atividade pozolânica com cal

O ensaio mecânico para a determinação da atividade pozolânica com cal foi feito conforme norma NBR 5751 (ABNT, 2012). A resistência média foi de $7,1 \pm 0,6$ MPa aos 7 dias, valor superior ao mínimo de 6 MPa exigido pela norma NBR 5751(ABNT, 2012). A resistência da argamassa de cal é atribuída a formação de silicatos de cálcio hidratados (CSH) e silicoaluminatos de cálcio hidratados (CASH), devido a reação das fases reativas de sílica e alumina presentes no RCV com os íons Ca^+ oriundos da dissolução da cal hidratada em meio aquoso.

O resultado do índice de atividade pozolânica da argamassa com cal é semelhante aos resultados obtidos em outras pesquisas, os quais se encontram entre

7 e 8 MPa. Torres e Matias (2016) produziram uma argamassa com RCV de massa específica de 2,65g/cm³ e módulo de finura igual a 2,71 em substituição ao agregado natural na proporção 1 : 1.6 : 3,4 (cal:RCV: agregado). A argamassa com o teor de 40% de substituição por RCV apresentou aos 28 dias resistência à compressão de 7,1 MPa. Castro *et al.* (2017) caracterizaram cimentos compostos com RCV e obteve 7,6 Mpa de resistência à compressão para o resíduo de telha com massa específica de 2,65g/cm³.

4.1.2.10 Análise DRX e TG/DTG da argamassa de cal hidratada

O DRX e o termograma TG/DTG para a argamassa formulada com cal hidratada e RCV oriunda do índice de atividade pozolânica com cal aos sete dias de cura estão representados na Figura 4.14 e 4.15. No difratograma da argamassa, composta por areia, cal e RCV, foi verificada a existência de produtos de hidratação CSH e CASH. Os picos de quartzo são oriundos do agregado miúdo presente no material.

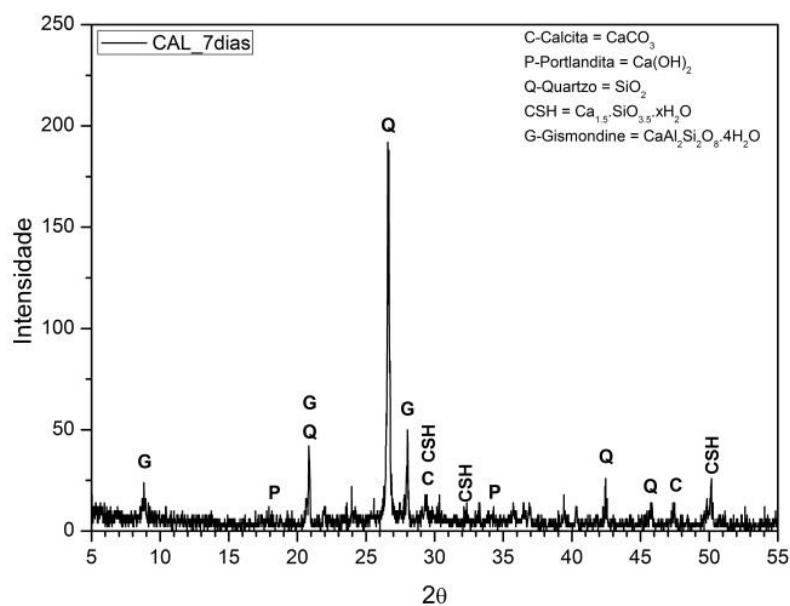


Figura 4-14 - DRX da argamassa de cal e RCV

A fase CASH ocorreu na forma de gismondina, no qual apresenta relativa cristalinidade quando comparado com o CSH, conforme o pico mostrado no DRX. É notável que simultaneamente a intensidade dos picos principais de Portlandita - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($18,08^\circ$ e $34,10^\circ$ em 2θ) apresentam-se baixos, assim como picos de carbonato de cálcio - CaCO_3 .

A transformação da portlandita foi responsável pela formação de gismondina e calcita, sendo a calcita devido à carbonatação atmosférica, conforme verificado por Antionhos e Tsimas (2004). O ganho da resistência não se deve só a hidratação do gel CSH, pois a formação de gismondina é parcialmente responsável pela compactação da pasta (TANG *et al.*, 2016).

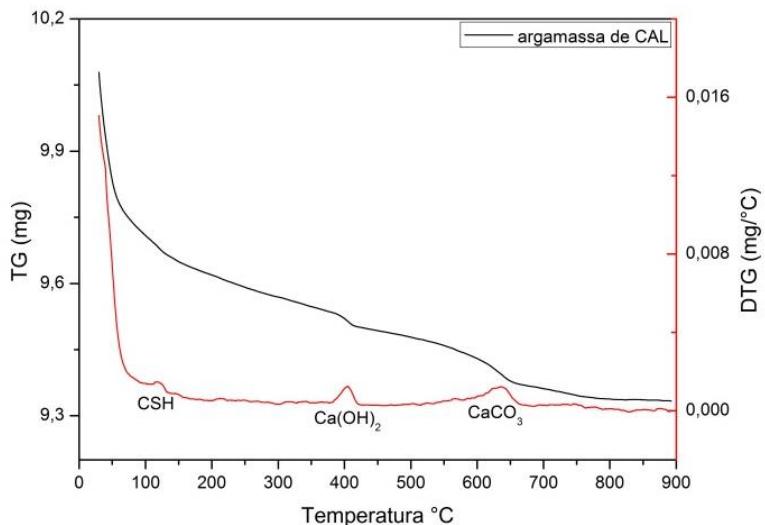


Figura 4-15 - TG/DTA da argamassa de cal

Na termogravimetria apresentada na Figura 4.15, tem-se que aos 7 dias de cura da argamassa de cal e RCV, é detectado um pico endotérmico a ~ 120°C correspondente a presença de CSH e água. Por seguite tem-se a curva característica de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ detectada em cerca de 410°C, com uma perda de peso relativa de 4,97%, valor baixo para uma pasta a base de cal hidratada. Por fim, a decomposição de CaCO_3 é detectada a cerca de 640°C (MOROPOULOU; BAKOLAS; AGGELAKOPOULOU, 2004).

4.1.3 Propriedades das Argamassas no estado fresco

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco da argamassa de traço 1:1:6, tais propriedades são importantes por estarem relacionadas com a trabalhabilidade desse material e irão influenciar nas propriedades no estado endurecido e microestrutura.

4.1.3.1 Índice de consistência

Os resultados encontrados no ensaio para determinação do índice de consistência das argamassas se encontram na Figura 4.16.

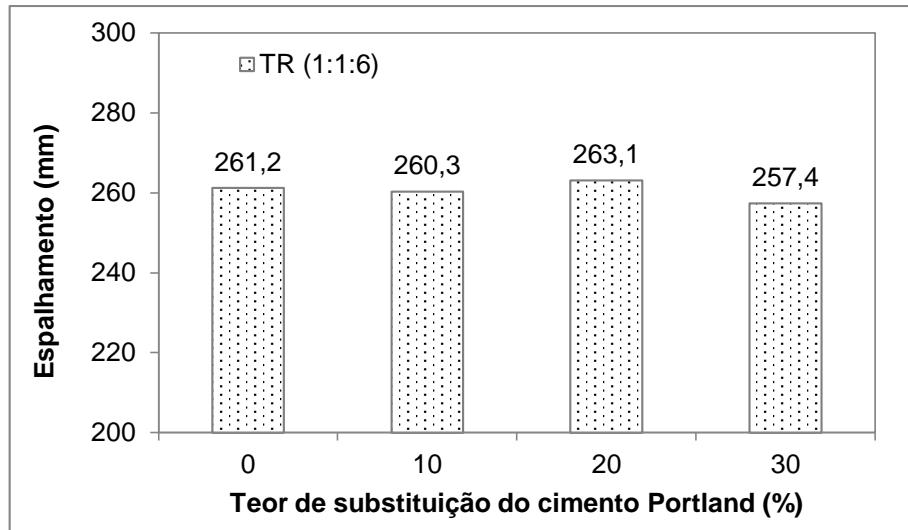


Figura 4-16 - Espalhamento obtido para o ensaio de Índice de Consistência

A quantidade de água adicionada a cada traço foi tal que o índice de consistência ficasse na faixa de (260 ± 5) mm recomendada pela norma NBR 13276 (ABNT, 2005). Tal premissa foi seguida a fim de se obter adequada trabalhabilidade das argamassas com substituição por RCV sem o uso de aditivos plastificantes.

Na Figura 4.17 são apresentadas as relações água/cimento (a/c) e água/aglomerantes hidráulicos ($a/aglo$), no caso o RCV e o CP.

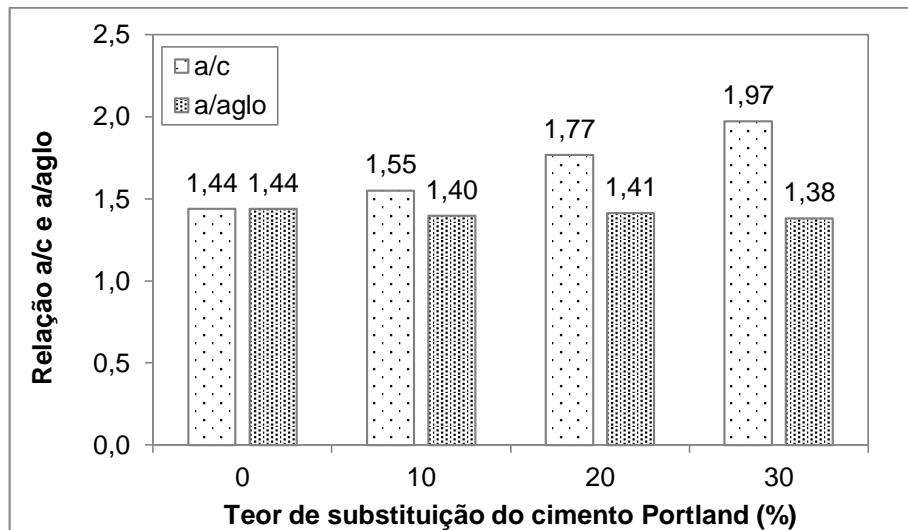


Figura 4-17 - Relações a/c e $a/aglo$ em função dos teores de RCV

A partir da análise da Figura 4.17, foi possível constatar que a relação a/c aumentou, em virtude da substituição do teor de cimento e da quantidade de água necessária para manter a consistência da argamassa. Por outro lado, a/aglo diminui de forma linear com o aumento do teor de substituição do cimento Portland pelo RCV, com um pequeno desvio do traço de 20% que apresentou um relação água/aglomerantes hidráulicos maior que o traço de 10%, o que foi refletido em um maior índice de consistência (263,1mm), que pode ser observado na Figura 4.16.

Para todos os teores de substituição, se obteve uma relação água/aglomerantes hidráulicos menor que a do traço de referência (Figura 4.17), isto indica que o RCV possui capacidade de melhorar a plasticidade da argamassa, mesmo possuindo área superficial maior, aproximadamente, duas vezes a área superficial do CP, pois se esperaria que fosse preciso mais água para se alcançar o mesmo índice de consistência tendo em vista que a substituição foi feita em massa. Pode-se afirmar que o maior volume do RCV produziu uma maior quantidade de pasta, a qual foi empregada no preenchimento do volume de vazios deixado pela areia, e o excedente contribui para o espalhamento da argamassa.

Torres e Matias (2016) observaram que para taxas semelhantes de água/aglutinante, as argamassas com telhas e resíduos de porcelana apresentaram maiores valores de espalhamento quando comparadas à argamassa com resíduo de tijolo, o que significa que estas argamassas requerem menos quantidades de água para conseguir uma boa trabalhabilidade. Portanto, constata-se que o teor de água para um mesmo espalhamento é inversamente proporcional a absorção de água desses materiais. Nesses casos, as argamassas requerem maiores quantidades de água para obter uma capacidade de trabalho aceitável devido à capacidade de absorção de água dos resíduos.

4.1.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

O resultado do ensaio para determinação da densidade de massa está apresentado na Figura 4.18.

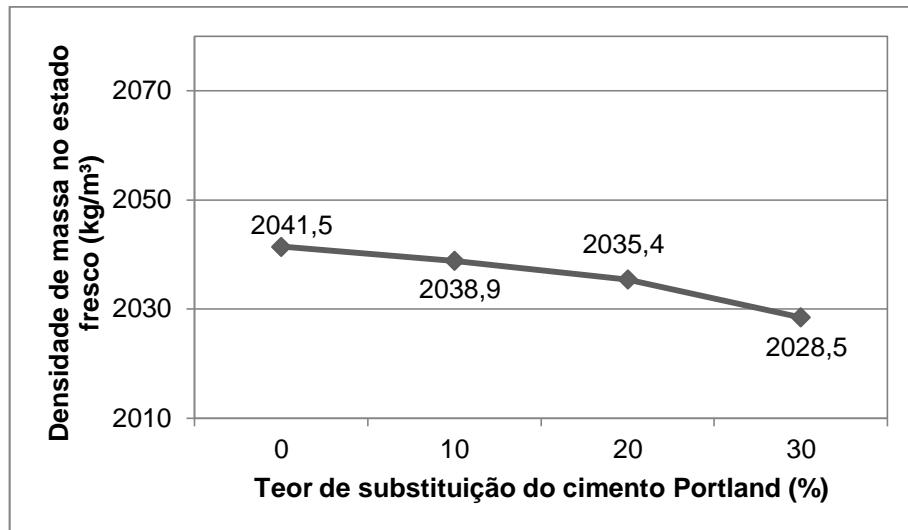


Figura 4-18 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco

A partir da análise da Figura 4.18 constata-se que a densidade de massa diminui com o aumento do teor de substituição do cimento Portland pelo RCV, tendo em vista que o peso específico deste ser menor que o do aglomerante principal, como descrito na Tabela 4.3.

O teor de ar incorporado é uma propriedade ligada a densidade de massa, pois quanto menor a densidade da argamassa, maior será o teor de ar incorporado. Esta propriedade é importante porque está diretamente relacionada a trabalhabilidade da argamassa.

Na Figura 4.19 está apresentado o resultado do teor de ar incorporado das argamassas.

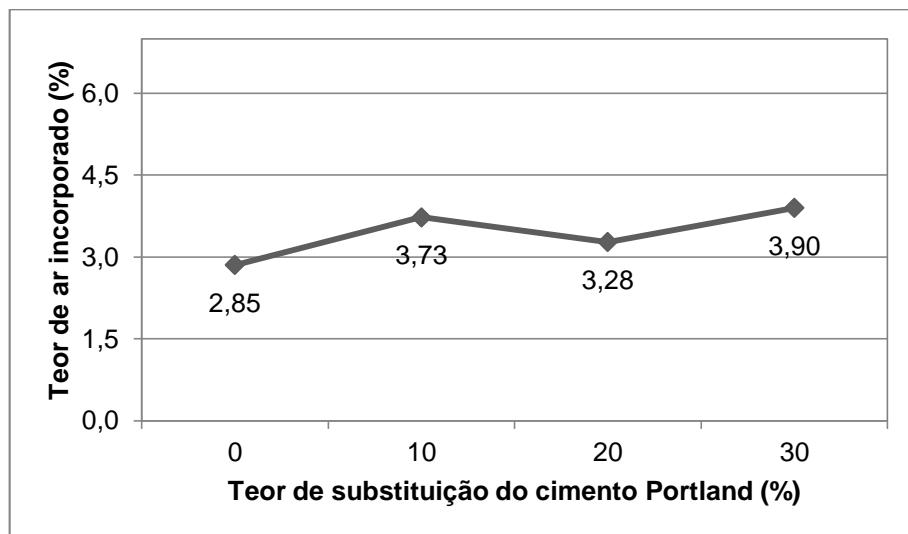


Figura 4-19 - Teor de ar incorporado das argamassas

Percebe-se que o teor de ar incorporado na argamassa aumenta com o acréscimo do teor de substituição do cimento Portland pelo RCV, o que vem corroborando a premissa que o RCV confere melhor trabalhabilidade as misturas de argamassa, como foi observado na análise da relação água/aglomerantes da Figura 4.17. Esse aumento no conteúdo do ar incorporado está correlacionado ao fato de que as partículas de RCV são angulares, causando assim um pior arranjo da mistura (AZEVEDO *et al.*, 2017). O teor de ar incorporado cresce de forma linear, com exceção de um pequeno deslocamento no teor de 20%, que pode ter sido reflexo de uma maior relação água/aglomerantes hidráulicos que resultou num espalhamento maior que esperado pelo comportamento dos outros traços.

Mehta e Monteiro (2014) explicam que o ar incorporado terá um efeito adverso sobre a resistência dos materiais compósitos devido ao aumento da porosidade. No entanto a melhoria da trabalhabilidade ocasionada pelo ar incorporado leva a uma melhor a compacidade da mistura o que pode acarretar em aumento de resistência quando se trata de compósitos com elevada relação água/cimento.

Infere-se que o RCV aumenta o teor incorporado das argamassas. Tal aumento segundo Azevedo *et al.* (2017) exerce uma influência substancial no desempenho da mistura. As argamassas com baixo conteúdo de ar incorporado têm uma consistência mais rígida e menos fluida que pode reduzir a produtividade da aplicação do material. Por outro lado, o excesso de ar incorporado pode afetar tanto nas características reológicas, gerando uma fluidez excessiva devido à maior quantidade de poros, e resultando na queda da resistência mecânica.

4.1.3.3 Retenção de água

Os resultados obtidos no ensaio de retenção de água estão descritos na Figura 4.20, e abaixo do rótulo do valor de cada retenção está apresentado o valor da relação água/aglomerantes hidráulicos do respectivo traço. No geral, verificou-se que os teores de retenção de água se mostraram equivalentes independente do teor de RCV substituído.

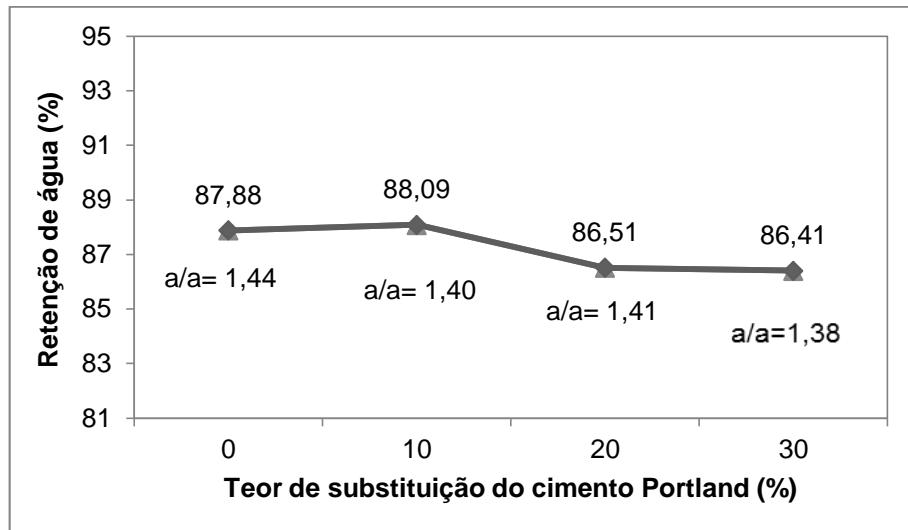


Figura 4-20 - Retenção de água para as argamassas

De acordo com a norma NBR 13281/2005, a qual especifica os requisitos que as argamassas destinadas ao revestimento de paredes deve cumprir. Tem-se que todos os traços estão classificados na classe de retenção de água “U4”, segundo Tabela 2.4, que varia de 86 a 94%.

4.1.4 Propriedades das argamassas no estado endurecido

4.1.4.1 Densidade de massa no estado endurecido

Os valores obtidos no ensaio de densidade de massa das argamassas no estado endurecido estão apresentados na Figura 4.21. A densidade de massa no estado endurecido indica o grau de compacidade da argamassa, e é menor do que a densidade de massa no estado fresco em função da evaporação da água de amassamento.

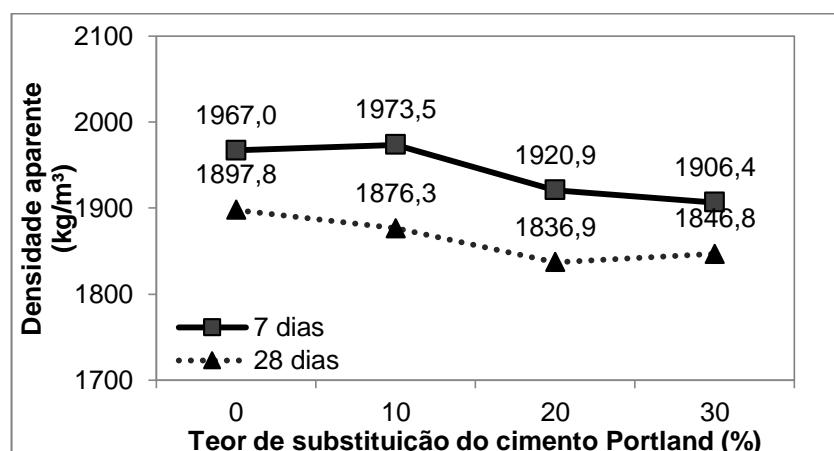


Figura 4-21 - Densidade de massa no estado endurecido

Infere-se que com exceção do teor de 10% aos 7 dias, que a densidade cai conforme se substitui o cimento Portland por RCV. Esta queda deve-se ao menor peso específico do RCV comparado ao CP. O comportamento excêntrico do traço 10% aos 7 dias se deve a maior retenção de água apresentada por esse traço e também por um empacotamento mais eficiente da matriz cimentícia. Embora o RCV seja mais leve que o cimento Portland, a massa de aglomerantes hidráulicos foi constante para todos os traços, o que indica que havia um maior volume de aglomerantes conforme se aumentava o teor de substituição.

Em sua pesquisa, Awoyera *et al.* (2017), observaram comportamento semelhante ao desta pesquisa e relataram que houve apenas uma ligeira variabilidade na densidade aparente das argamassas. No entanto, a densidade da argamassa de referência foi maior que a das outras. No caso da argamassa SUB10, o evidente aumento na densidade no estado endurecido advém de um melhor empacotamento, o qual é consistente com a distribuição granulométrica mais fina do RCV (GONÇALVES *et al.*, 2009).

4.1.4.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados para o ensaios de absorção de água por capilaridade aos 28 dias se encontram na Figura 4.22. Onde os grupos “A, 10” e “A, 90” significam a percentagem de massa de água absorvida por capilaridade aos 10 e 90 minutos, respectivamente.

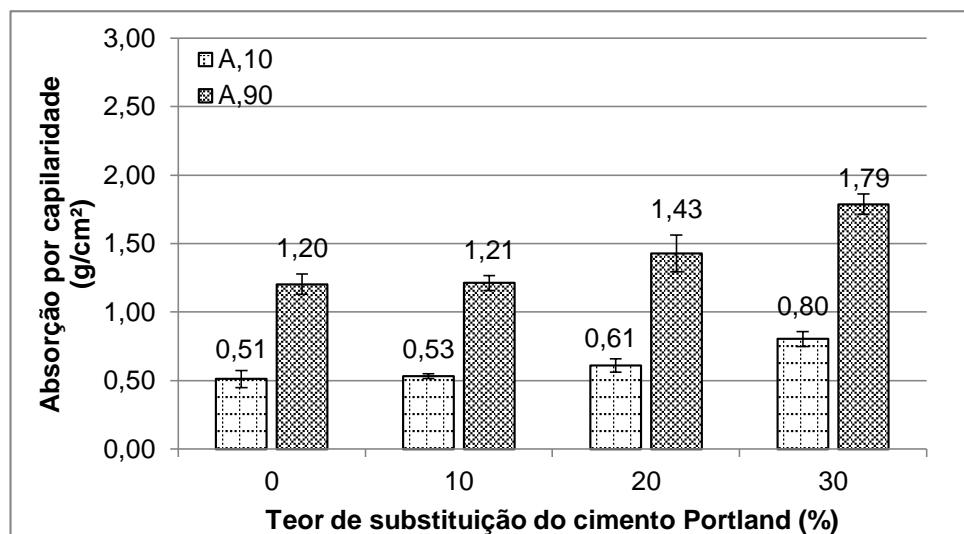


Figura 4-22 - Absorção de água por capilaridade

Observa-se que essa propriedade aumentou linearmente com o teor de substituição do CP por RCV em ambas as idades devido ao aumento do teor de ar incorporado e da relação água/cimento que as argamassas com substituição de CP por RCV apresentaram. Conforme Metha e Monteiro (2008), a água que não é utilizada na hidratação dos compostos cimentícios, evapora-se dando origem aos vazios capilares. No entanto, conforme Corinaldesi (2012), o aumento dessa propriedade pode ser vantajosa em termos de uma drenagem eficaz da umidade presente dentro da argamassa.

Na Figura 4.23 tem-se a ilustração da absorção por capilaridades dos corpos de prova. A esquerda tem-se os corpos de prova do traço SUB10 e a direita os do traço SUB30.



Figura 4-23 - Ensaio de absorção por capilaridade

Pode-se observar, analisando a Figura 4.23 que a água absorvida por capilaridade atinge uma altura maior para os corpos de prova do traço SUB30, indicando visualmente que essa propriedade apresentou melhor desempenho para o traço SUB10.

Embásado por Torres e Matias (2016) pode-se afirmar que a baixa densidade aparente do RCV comparado ao CP ($0,71$ versus $1,00\text{g}/\text{cm}^3$) associada a uma estrutura interna mais porosa, que é característico dos materiais cerâmicos, justifique o aumento da absorção de água.

Na Figura 4.24 tem-se os coeficientes de capilaridade obtidos no ensaio de absorção obtidos a partir das massas de água absorvida aos 10 e 90 min.

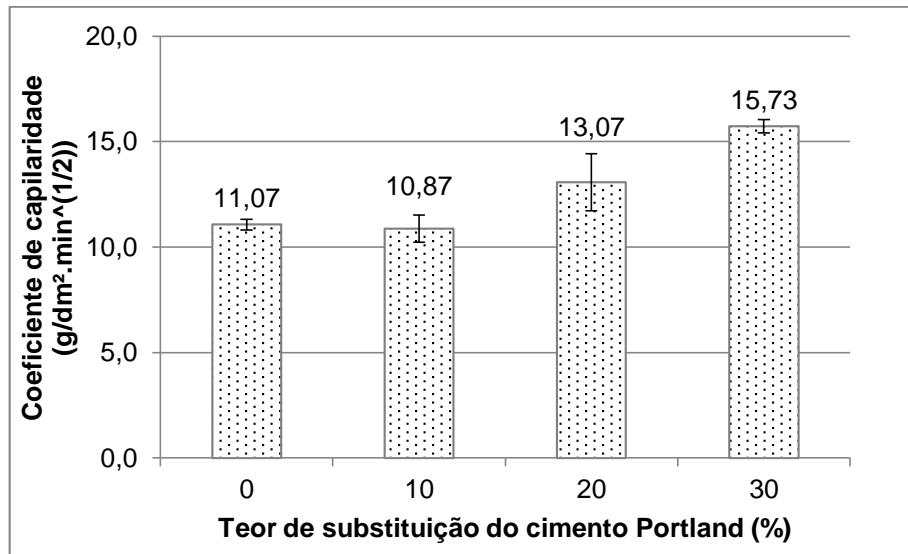


Figura 4-24 - Coeficiente de capilaridade

Com exceção do teor de 10% que apresentou absorção de água por capilaridade equivalente ao traço de referência, percebe-se que o coeficiente de capilaridade, assim como a absorção por capilaridade aumenta com o teor de substituição. Esse aumento foi resultado dos maiores teores de ar incorporado apresentados pelos traço SUB20 e SUB30, pois os vazios de ar incorporado são os maiores vazios em uma matriz cimentícia, podendo chegar até 3mm.

4.1.4.3 Absorção de água e índice de vazios

Na Figura 4.25 apresenta-se o resultado do ensaio para obtenção da absorção de água por imersão. Tal propriedade indica o volume de poros permeáveis de um corpo sólido poroso.

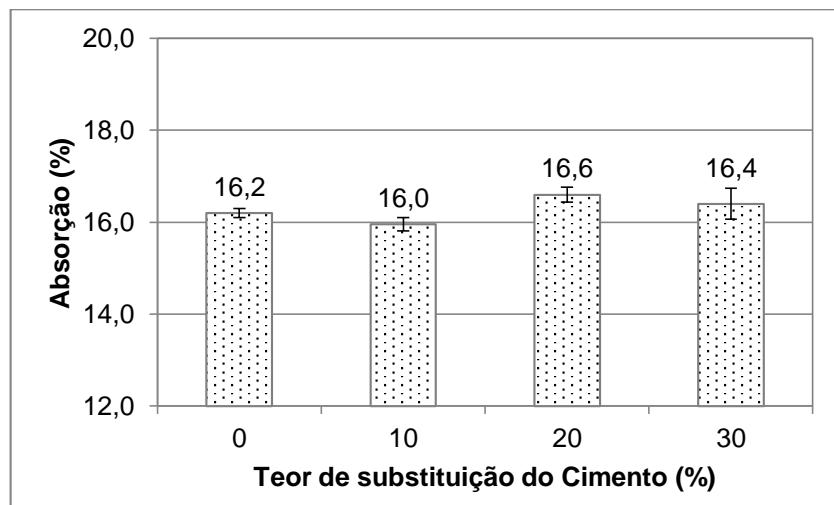


Figura 4-25 - Absorção de água por imersão das argamassas

Observa-se que assim como nas outras propriedades anteriormente discutidas, existe um discreto padrão de comportamento proporcional ao teor de substituição, no entanto o volume de poros permeáveis das argamassas são iguais.

De acordo com a Figura 4.25 observa-se que variação da absorção é baixa (faixa de 1,2% para menos e 2,5% para mais) e está dentro do desvio padrão do ensaio. Pode-se perceber que o RCV não alterou a porosidade das argamassas como também foi observado por Ramezanianpour e Jovein (2016) em concretos com substituição do cimento por metacaulim.

Os resultados para o índice de vazios das argamassas está apresentado na Figura 4.26.

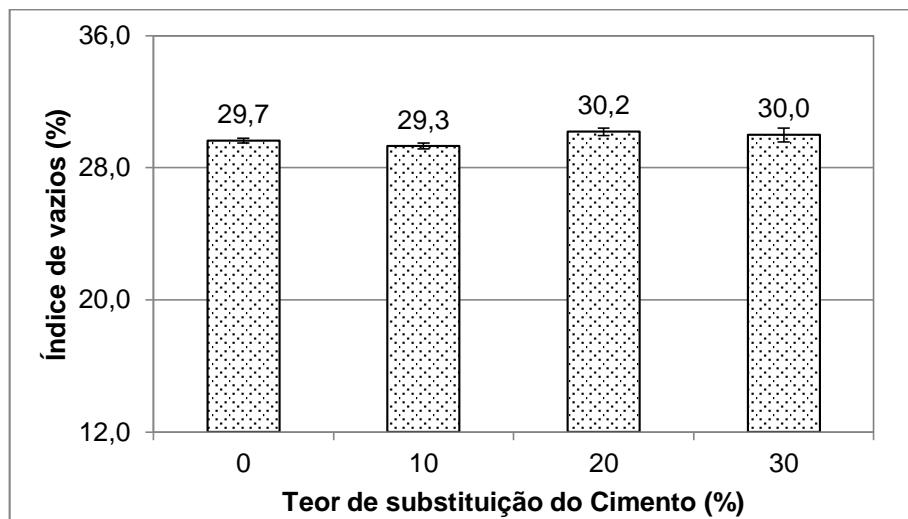


Figura 4-26 - Índice de Vazios obtidos para as argamassas

Tem-se que tais resultados foram análogos aos discutidos na absorção por imersão. Pode-se concluir com base na absorção por imersão quer todas as argamassas possuem o mesmo volume de poros/vazios permeáveis.

4.1.4.4 Módulo de elasticidade dinâmica

Na Figura 4.27 tem-se o resultado do módulo de elasticidade dinâmico obtido aos 28 dias. Infere-se que essa propriedade diminui discretamente com o teor de substituição do CP por RCV em função da menor massa específica do resíduo, com exceção da argamassa SUB10. Esta argamassa apresenta uma estrutura mais compacta e menos porosa confirmada pelas demais propriedades discutidas, em

virtude da finura e melhor empacotamento proporcionado pelo RCV levou a uma maior rigidez do corpo sólido (TORRES e MATIAS, 2016).

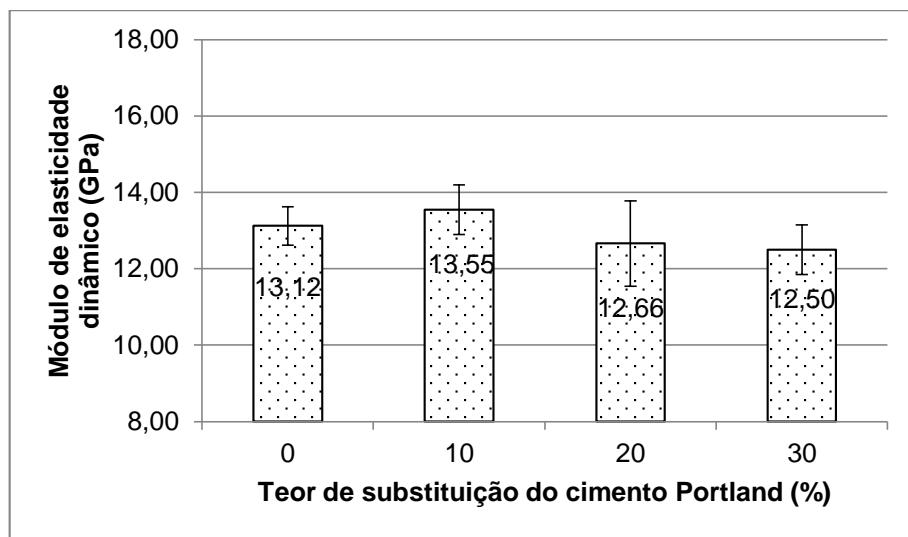


Figura 4-27 - Módulo de elasticidade dinâmico

Já nas argamassas SUB20 e SUB30, a leve queda do módulo de elasticidade, em função da menor densidade destas, se deve a diminuição do teor de cimento Portland e consequente superior relação água/cimento junto com o maior teor de ar incorporado, quando comparado com as argamassas REF e SUB10. A magnitude da diminuição do módulo de elasticidade foi de 3,51% e 4,73% para as argamassas SUB20 e SUB30, as quais podem ser desconsiderada em função do desvio padrão apresentando no ensaio.

4.1.4.5 Resistência à compressão

Os efeitos da substituição do RCV como aglomerante em 0%, 10%, 20% e 30% em peso sobre a resistência à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias são mostrados na Figura 4.28.

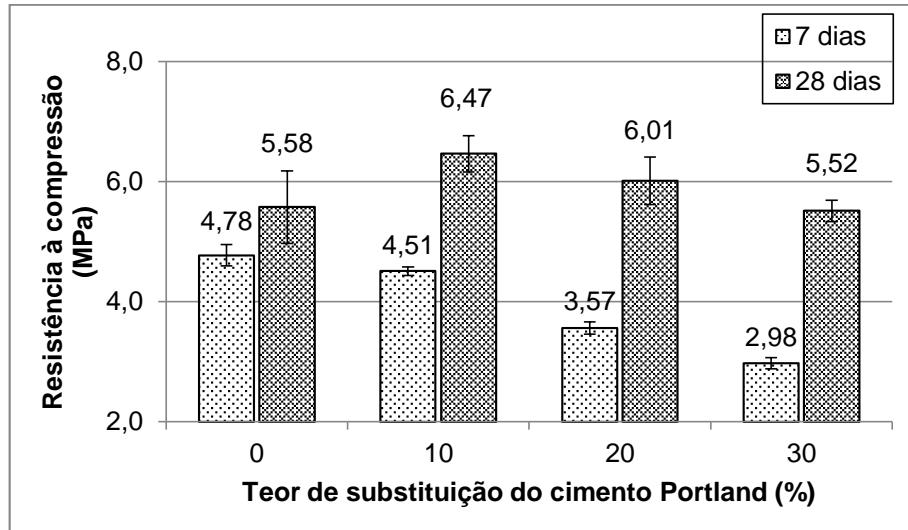


Figura 4-28 - Resistência à compressão medida aos 7 e 28 dias

Aos 7 dias de idade, tem-se uma queda da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição do aglomerante em função da diminuição do cimento Portland e da ausência de produtos de hidratação do RCV. No entanto para o teor de 10% essa queda foi de apenas 5% da resistência à compressão em virtude do maior volume e finura do resíduo ter sido capaz de densificar a matriz.

Os resultados mostram que todas as misturas de argamassa contendo RCV apresentaram resistência à compressão igual ou maior a argamassa de referência (5,58 MPa aos 28 dias), sendo que para os teores de 10 e 20% em massaouve um leve aumento da resistência à compressão, reflexo do refinamento do tamanho de poros e de grão causado pela maior finura do RCV e sua pozolanicidade. Essa compensação da resistência à compressão pode ser explicada também pela formação de produtos da reação pozolânica como C-S-H e CASH.

O maior aumento de resistência foi de 16% em relação à argamassa de referência, obtido para o traço de SUB10. Na pesquisa de Awoyer *et al.* (2017), a maior resistência à compressão também foi desenvolvida na mistura com 10% de pó cerâmico em substituição ao cimento. A maior resistência é justificado como resultado da ação do enchimento (contribuído por pó cerâmico que é mais fino do que o cimento) e a reação pozolânica. As ações de enchimento ajudam a melhorar a força em materiais cimentados misturados, e ocorre quando o material substituto é mais fino do que as partículas de cimento (CHINDAPRASIRT; RUKZON, 2014; JAMIL *et al.*, 2016).

Em suma, conforme Senff *et al.* (2014), a equivalência das resistências entre as argamassas com substituição e de referência podem ser justificadas pela alteração da quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) proporcionada pela reação pozolânica, juntamente ao desenvolvimento de uma estrutura interna menos porosa devido as mudanças no tamanho médio dos poros, na distribuição do tamanho dos poros e na morfologia dos poros devido ao maior volume do RCV quando comparado ao CP.

Conforme Mehta e Monteiro (2014) os vazios de ar incorporado são maiores que os vazios capilares. Trazendo este conceito para a discussão dos resultados, observa-se que os traços SUB20 e SUB30 apresentaram aumento da absorção por capilaridade e decréscimo da resistência mecânica em virtude do maior volume de vazios de ar incorporado na mistura. Por outro lado, devido ao refinamento do tamanho de poros e grãos que o RCV promoveu, ocorreu uma diminuição do volume de vazios capilares significante que foi capaz de equilibrar o volume de vazios total das argamassas de forma que se obteve resultados equivalente de absorção por imersão em todos os traços

4.1.4.6 Resistência à tração na flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão para as argamassas com 0%, 10%, 20% e 30% de substituição do cimento Portland pelo RCV aos 7 e 28 dias estão apresentadas no gráfico na Figura 4.29.

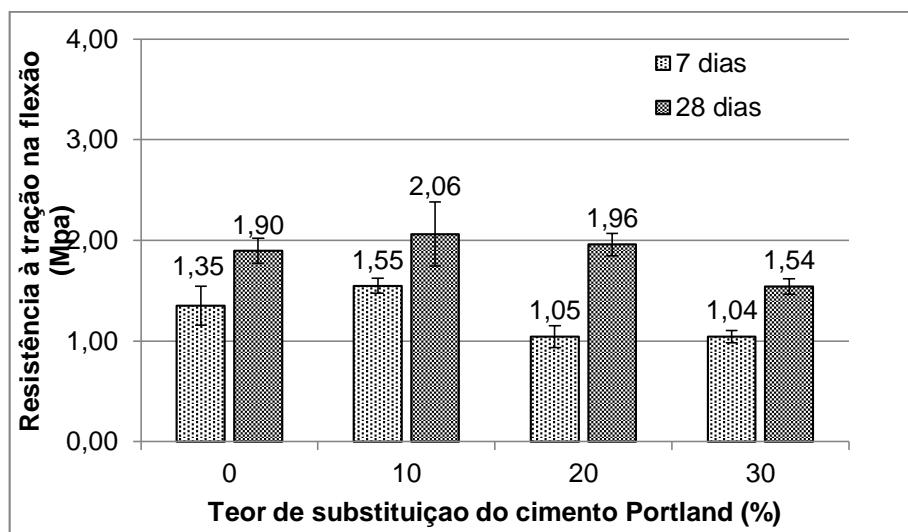


Figura 4-29 - Resistência a tração na flexão medida aos 7 e 28 dias

Infere-se aos 7 dias que a resistência à tração variou inversamente com o teor de substituição, com exceção do tração 10%, o qual apresentou o maior valor de resistência nas duas idades testadas, tal comportamento também foi observado por Awoyer *et al.* (2017). Aos 28 dias de idade não há padrão de comportamento, tendo que para 10 e 20% de substituição do cimento por RCV, houve um pequeno aumento comparado a mistura de referência (0% de substituição), enquanto o teor de 30% apresentou uma queda de aproximadamente 19%.

Todas as propriedades se apresentaram melhores para o teor de substituição de 10%, enquanto que para os teores de 20 e 30% foram sensivelmente afetadas devido aos poros que não foram preenchidos completamente pela adições, junto com os poros oriundos do maior teor de vazios apresentado pelas argamassas com estes teores, o que explica a queda da resistência (HARBI; DERABLA; NAFA, 2017).

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

As conclusões obtidas com o estudo da influência do RCV nas propriedades de argamassas mistas foram:

- O resíduo de cerâmica vermelha apresenta um índice de atividade pozolânica elevado, o que faz desse resíduo um material adequado para uso suplementar em compósitos de cimento Portland ou como material cimentante em argamassas de cal.
- O emprego do RCV como pozolana confere uma opção de destinação adequada do resíduo.
- As argamassas com teores de substituição de CP por RCV mantiveram o índice de consistência dentro do normatizado atrelado a menores teores de relação água/aglomerantes hidráulicos. Essas argamassas apresentaram também densidade de massa no estado fresco menor e teor de ar incorporado menores que a argamassa de referência, o que resulta numa melhor trabalhabilidade durante a aplicação dos materiais compostos com RCV.
- As argamassas com teores de substituição de 10, 20 e 30 % mantiveram suas propriedades de retenção de água no estado fresco, absorção por imersão e índice de vazios equivalentes à argamassa de referência e dentro dos padrões da NBR 13281 (ABNT, 2005), a qual define requisitos das propriedades de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos.
- Com exceção do traço SUB10 que apresentou absorção por capilaridade semelhante a argamassa de referência, essa propriedade aumentou com o teor de substituição do CP por RCV, em função do maior teor de ar incorporado apresentado no estado fresco. No entanto esse fato pode favorecer uma melhor secagem de umidade destas argamassas.
- A resistência à compressão e à tração na flexão se mostraram compatíveis com a argamassa de referência, sendo que houve uma melhoria dessas propriedades para as argamassas com 10 e 20% de substituição do CP por RCV.

- O módulo de elasticidade permaneceu ligeiramente inferior para os traços SUB20 e SUB30 quando comparado ao da argamassa de referência, o que indica que para uma resistência equivalente, as argamassas com RCV possuem maior capacidade de deformação. Com exceção do traço SUB10, o qual apresentou o maior valor de módulo em virtude da maior densificação que ocorreu em sua matriz.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizar o RCV como material aglomerante em argamassas e grautes para reparação de edifícios históricos, tendo que estes materiais requerem uma boa trabalhabilidade, baixa retração, capacidade de aderência com a interface do material original, compatibilidade química, mecânica e durabilidade. Pois os compósitos baseadas em cimento são inadequadas devido à potencial falta de compatibilidade química e mecânica com as construções antigas, assim como as resinas. (MÜLLER; MICCOLI; FONTANA, 2016).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI. ESTUDO TÉCNICO SETORIAL DA CERÂMICA VERMELHA: Subsídios para a Elaboração do Plano de Desenvolvimento Sustentável da Cadeia Produtiva de Cerâmica Vermelha. Brasília: Inverta, 2016. 265 p. (Estudo Desenvolvido no Âmbito do Convênio 076/2010 - ABDI | MDIC). Disponível em: <http://www.abdi.com.br/Estudo/05prova_página_única - Cerâmica Vermelha.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2016.

AGOPYAN, Vahan; JONH, Vanderley M. O desafio da sustentabilidade na construção civil. São Paulo: Blucher, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Use of raw or processed natural pozzolans in concrete. ACI 232.1R-00. ACI committee 232. December 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw Calcined Natural Pozzolan For Use in Concrete. 12th. Philadelphia, 2012.

ANICER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. Setor. Disponível em: <<http://portal.anicer.com.br/setor/>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

Antionhos S, Tsimas S, 2004. Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime Part I: Compressive strength and pozzolanic reaction rate. Cement and Concrete Research , 34(5): 769–779.

ANTIOHOS, S.; PAPAGEORGIOU, A.; TSIMAS, S.. Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime. Part II: Nature of hydration products, porosity and microstructure development. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 36, n. 12, p.2123-2131, dez. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.013>.

ANTONI, M. et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 42, n. 12, p.1579-1589, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6467: Ensaio de Inchamento da Areia. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.-NBR 5751: Material pozolânicos –Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Determinação da densidade de massa aparente em estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: Argamassa de Assentamento e Revestimento de paredes e Teto- Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

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, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland - determinação da densidade. Rio de Janeiro, 2000.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 47: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

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

AWOYERA, P.o. et al. Suitability of mortars produced using laterite and ceramic wastes: Mechanical and microscale analysis. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 148, p.195-203, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.031>.

AZEVEDO, A. R. G. et al. Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 148, p.359-368, set. 2017. Elsevier BV.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S.. Caracterização dos resíduos cauliníticos das indústrias de mineração de caulim da amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. *Cerâmica*, [s. L.], v. 1, n. 58, p.36-42, 2012.

BARONIO, G.; BINDA, L.; LOMBARDINI, N.. The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 11, n. 1, p.33-40, fev. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618\(96\)00031-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618(96)00031-1).

BATTAGIN, Arnaldo Forti; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva. O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais: -. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 24. p. 762-790.

BENTAYEB, A. et al. XRD and HRTEM characterization of pyrophyllite from Morocco and its possible applications. *Applied Clay Science*, [s.l.], v. 22, n. 5, p.211-221, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-1317\(03\)00066-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-1317(03)00066-8).

Billong, N., Melo, U.C., Kamseu, E., Kinuthia, J.M., Njopwouo, D. Improving hydraulic properties of lime–rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK), *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 4, April 2011, Pages 2157-2161

BINICI H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials* 2007;21:1191–7

CARASEK, Helena et al. Bond between 19th Century lime mortars and glazed ceramic tiles. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 59, p.85-98, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.043>.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 28. p. 893-944.

CASTRO, A. L. et al. Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, [s.l.], v. 63, n. 365, p.65-76, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633652036>.

CELIK, I.b.. The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development. *Powder Technology*, [s.l.], v. 188, n. 3, p.272-276, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2008.05.007>.

CEOTTO, L. H.; BANDUK, R. C.; NAKAMURA, E. H. Revestimentos de Argamassas. In: *Habitare*. Porto Alegre: ANTAC, 2005. 96 p. Recomendações Técnicas Habitare, v. 1.

CERAMIE-UNIE, 2012. Paving the Way to 2050. The Ceramic Industry Roadmap. Ceramie-Unie A.I.S.B.L., Brussels.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S.; SIRIVIVATNANON, V.. Strength and chloride resistance of the blended Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand, *Mater. Struct.* (2014).

CHIKOUCHE, Mohamed Aziz; GHORBEL, Elhem; BIBI, Mekki. The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 106, p.330-341, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.128>.

CINCOTTO, Maria Alba; SILVA, Maria Angélica Covelo; CASCUDO, Helena Carasék. Argamassas de revestimento: característica, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: Ipt, 1995.

CINCONTO, Maria Alba; QUARCIONI, Valdecir Ângelo; JONH, Vanderley Moacyr. Cal na construção Civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 22. p. 696-725.

CORINALDESI, Valeria. Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 35, p.778-784, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.131>.

CTGAS-ER; SEBRAE-RN. Diagnóstico da indústria de cerâmica vermelha do Estado do Rio Grande do Norte. 2012. 134p.

FARIA-RODRIGUES, P. Resistance to salts of lime and pozzolan mortars. In: Groot C, editor. International RILEM workshop on repair mortars for historic masonry. RILEM Publications; 2009. p. 99–110.

GALÁN-ARBOLEDAS, Rosendo J. et al. Energy, environmental and technical assessment for the incorporation of EAF stainless steel slag in ceramic building materials. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 142, p.1778-1788, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.110>.

GARCIA, E. et al. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. *Cerâmica*, [s.l.], v. 61, n. 358, p.251-258, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581847>.

GARTNER, Ellis. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement And Concrete Research*, [s. L.], v. 1, n. 34, p.1489-1498, 20 jan. 2004.

GONÇALVES, J.p. et al. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 23, n. 5, p.1971-1979, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027>.

GRIGOLETTI, Giane de Campos. CARACTERIZAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DE INDÚSTRIAS DE CERÂMICA VERMELHA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. 2001. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, I Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

HARBI, Radhia; DERABLA, Riad; NAFA, Zahreddine. Improvement of the properties of a mortar with 5% of kaolin fillers in sand combined with metakaolin, brick waste and glass powder in cement. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 152, p.632-641, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.062>.

JAMIL, M. et al. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 128, p.185-198, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>.

KANNAN, Dima M. et al. High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 144, p.35-41, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115>

KHAN, Mohammad Saleem et al. Industrial ceramic waste in Pakistan, valuable material for possible applications. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 139, p.1520-1528, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.131>.

LAVAT, Araceli E.; TREZZA, Monica A.; POGGI, Mónica. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management*, [s.l.], v. 29, n. 5, p.1666-1674, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.019>.

LI, Haoxin et al. Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 133, p.1017-1026, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.149>.

MATIAS, Gina; FARIA, Paulina; TORRES, Isabel. Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 73, p.125-136, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>

MATIAS, Gina; FARIA, Paulina; TORRES, Isabel. Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behaviour. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 73, p.523-534, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 2^a edição, São Paulo 2014, editora IBRACON.

MEYER, C.. The greening of the concrete industry. *Cement And Concrete Composites*, [s.l.], v. 31, n. 8, p.601-605, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2012). Anuário Estatístico: Setor de Transformação de Não metálicos / Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília: SGM.

MOHAMMED, Siline. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 140, p.10-19, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.078>.

MOROPOULOU, Antonia; BAKOLAS, Asterios; AGGELAKOPOULOU, Eleni. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis.

Thermochimica Acta, [s.l.], v. 420, n. 1-2, p.135-140, out. 2004. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2003.11.059>

MÜLLER, Urs; MICCOLI, Lorenzo; FONTANA, Patrick. Development of a lime based grout for cracks repair in earthen constructions. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 110, p.323-332, maio 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.030>

NAVRÁTILOVÁ, Eva; ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 120, p.530-539, set. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>

ORUJI, Soheil et al. Strength activity and microstructure of blended ultra-fine coal bottom ash-cement mortar. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 153, p.317-326, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.088>.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S.. Reusing ceramic wastes in concrete. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 24, n. 5, p.832-838, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>.

RAMEZANIANPOUR, A.a.; JOVEIN, H. Bahrami. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 30, p.470-479, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>.

ROBAYO, Rafael A. et al. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 128, p.163-169, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023>.

SCHACKOW, A. et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 62, p.82-89, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019>.

Seco, A.; Ramirez, F.; Miqueleiz, L.; Urmeneta, P.; García, B.; Prieto, E. and Oroz, V. (2012). Types of Waste for the Production of Pozzolanic Materials – A Review, Industrial Waste, Prof. Kuan-Yeow Show (Ed.), ISBN: 978- 953-51-0253-3, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/industrial-waste/sustainableconstruction-with-pozzolanic-industrial-waste-a-review>.

SEBRAE. Cerâmicas do Rio Grande do Norte são certificadas por qualidade: -. 2015. Disponível em: <<http://www.rn.sebrae.com.br/noticia/ceramicas-do-rio-grande-do-norte-sao-certificadas-por-qualidade/>>. Acesso em: 14 fev. 2017.

SECO, A. et al. Types of Waste for the Production of Pozzolanic Materials – A Review. Industrial Waste, [s.l.], p.141-147, 7 mar. 2012. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/36285>.

SENFF, L. et al. Influence of red mud addition on rheological behavior and hardened properties of mortars. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 65, p.84-91, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.104>.

SENHADJI, Y. et al. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*, [s.l.], v. 254, p.314-323, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>.

SHI, Caijun; DAY, Robert L.. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators. *Cement And Concrete Research*, [s.l.], v. 30, n. 4, p.607-613, abr. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00214-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00214-3).

SILVA, João; BRITO, Jorge de; VEIGA, Rosário. Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 23, n. 1, p.556-564, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014>.

STAFFORD, Fernanda N. et al. Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 126, p.159-165, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.110>.

TANG, S.w. et al. Hydration process of fly ash blended cement pastes by impedance measurement. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 113, p.939-950, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.141>.

TOLEDO FILHO, R.d. et al. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement And Concrete Research*, [s.l.], v.37, n. 9, p.1357-1365, set. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.005>.

TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said. A sustentabilidade dos materiais de construção. 2. ed. Vila Verde: Tecminho, 2010. 460 p.

TORRES, Isabel; MATIAS, Gina. Sustainable mortars for rehabilitation of old plasters. *Engineering Structures*, [s.l.], v. 129, p.11-17, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.009>.

U.S. Geological Survey. 2011. Mineral commodity summaries 2011: U.S. Geological Survey, 198 p.

VEJMELKOVÁ, Eva et al. Properties of lime composites containing a new type of pozzolana for the improvement of strength and durability. *Composites Part B: Engineering*, [s.l.], v. 43, n. 8, p.3534-3540, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.053>.

VICHAN, Songsuda; RACHAN, Runglawan; HORPIBULSUK, Suksun. Strength and microstructure development in Bangkok clay stabilized with calcium carbide residue and biomass ash. *Scienceasia*, [s.l.], v. 39, n. 2, p.186-196, 2013. Science Society of Thailand - Mahidol University. <http://dx.doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2013.39.186>.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A. de; MONTEIRO, S. N.. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, [s.i], n. 50, p.254-260, jan. 2004.

ZHANG, Zuhua et al. Compositional, microstructural and mechanical properties of ambient condition cured alkali-activated cement. *Construction And Building Materials*, [s.i.], v. 113, p.237-245, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.043>.

ZHOU, Chun Hui; KEELING, John. Fundamental and applied research on clay minerals: From climate and environment to nanotechnology. *Applied Clay Science*, [s.i.], v. 74, p.3-9, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.013>.