



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

Nayara Jhéssica Marques da Fonsêca

**POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA CAL EM
TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO
CERÂMICO**

**Natal/RN
2018**

Nayara Jhéssica Marques da Fonsêca

**POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA CAL EM
TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO
CERÂMICO**

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

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar
Coorientador: Prof. Dr. Vamberto Monteiro da Silva

Natal/RN
2018

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

Fonsêca, Nayara Jhêssica Marques da.

Potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico / Nayara Jhêssica Marques da Fonsêca. - 2018.

86 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar.

Coorientador: Prof. Dr. Vamberto Monteiro da Silva.

1. Construção civil - Dissertação. 2. Resistência mecânica - Dissertação. 3. Durabilidade - Dissertação. 4. Microestrutura - Dissertação. I. Acchar, Wilson. II. Silva, Vamberto Monteiro da. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 691:699.8

**POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA CAL EM
TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO
CERÂMICO**

Nayara Jhéssica Marques da Fonsêca

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilson Acchar – Presidente

Prof. Dr. Dr. Vamberto Monteiro da Silva – Coorientador

Prof.^a Dr.^a. Jaquelígia Brito da Silva – Examinador Interno

Prof.^a. Dr.^a. Andreza Kelly Costa Nóbrega – Examinador externo

Natal/RN, 26 de março de 2018.

POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA CAL EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO

Nayara Jhébica Marques da Fonsêca

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar

Coorientador: Prof. Dr. Vamberto Monteiro da Silva

RESUMO

A construção civil é uma importante indústria no sistema econômico em que está inserida. Além de gerar emprego e renda, o setor também contribui modificando o cenário natural para garantir à sociedade moradia, segurança e bem-estar. No entanto, os altos índices de recursos naturais utilizados pela construção, bem como as grandes quantidades de resíduos gerados por ela, trazem grande preocupação referente ao impacto ambiental negativo gerado e as suas consequências. Tendo em vista o alto consumo energético no processo de fabricação do cimento, as grandes quantidades de CO₂ emitidas durante a queima do clínquer, a disponibilidade de cal hidratada na região Nordeste do Brasil e ainda, o alto índice de perdas que envolve os blocos cerâmicos utilizados em alvenarias de vedação, esse trabalho avaliou o potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico (RC). Foram desenvolvidas composições ternárias de solo + 12% cimento + 4% RC, solo + 12% cal hidratada + 4% RC, quaternárias de solo + 6% cimento + 6% cal hidratada + 4% RC. As composições também foram formuladas sem adição de RC para servirem como referência e possibilitar a análise da influência do resíduo sobre o comportamento dos tijolos produzidos. Após os processos de prensagem e cura dos tijolos, estes foram submetidos a ensaios de resistência mecânica, absorção de água e durabilidade modificada. Em seguida, analisou-se a microestrutura desses materiais através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de raios X (DRX) das superfícies de fratura. Dados os teores de sílica e alumina presentes, tanto no solo empregado, como no resíduo cerâmico finamente moído, pode ocorrer a reação

pozolânica que, por sua vez, contribui para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas das composições estudadas. Observou-se que os tijolos produzidos apresentaram boas condições de resistência a compressão simples, absorção de água e durabilidade em acordo com recomendações das Normas vigentes para tijolos em aplicação não estrutural. Os resultados experimentais constataram que a composição ternária solo + 12% cimento + 4% RC apresentou valores mais significativos, ultrapassando 2 Mpa de resistência à compressão simples, a partir dos 150 dias de cura. Entre as misturas quaternárias, a formulação solo + 6% cimento + 6% cal e 4% RC apresentou o melhor desempenho, superando a resistência à compressão mínima de 2 MPa recomendada pela Norma, a partir dos 120 dias de cura. Com base nos resultados obtidos é possível concluir que, tanto do ponto de vista técnico, como econômico, a substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento, é viável, com os benefícios da incorporação do RC e observando-se os tempos de cura necessários para a efetiva hidratação dos aglomerantes e das reações pozolânicas.

Palavras-chave: Construção civil; resistência mecânica; durabilidade; microestrutura.

POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PELA CAL EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO

Nayara Jhêssica Marques da Fonsêca

Adviser: Prof. Dr. Wilson Acchar

Co-Adviser: Prof. Dr. Vamberto Monteiro da Silva

ABSTRACT

Civil construction is an important industry in the economic system in which it is inserted. In addition to generating employment and income, the sector also contributes by modifying the natural landscape to guarantee society housing, security and well-being. However, the high indices of natural resources used by the construction, as well as the large amounts of waste generated by it, raise great concern about the negative environmental impact generated and the serious consequences. Considering the high energy consumption in the cement manufacturing process, the large amounts of CO₂ emitted during clinker firing, the availability of hydrated lime in the Northeast region of Brazil, and also the high loss rate involving the ceramic blocks used in sealing masonry, this work evaluated the potential of cement substitution by lime in soil-cement bricks with ceramic residue (RC) incorporation. Ternary compositions of soil + 12% cement + 4% CR, soil + 12% hydrated lime + 4% CR, quaternary soil + 6% cement + 6% hydrated lime + 4% CR were developed. The compositions were also formulated without addition of RC to serve as reference and enable the analysis of the influence of the residue on the behavior of the bricks produced. After the pressing and curing processes of the bricks, they were submitted to tests of mechanical resistance, water absorption and modified durability. Then, the microstructure of these materials was analyzed through Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) of the fracture

surfaces. Given the silica and alumina contents present in both the used soil and the finely ground ceramic residue, the so-called pozzolanic reaction occurs, that contribute to the improvement of the physical and mechanical properties of the compositions studied. It was observed that the bricks produced presented good conditions of resistance to simple compression, water absorption and durability in accordance with the recommendations of the current Standards for bricks in non-structural application. The experimental results showed that the ternary composition soil + 12% cement + 4% CR showed more significant values, exceeding 2 MPa of simple compression strength, after 150 days of cure. Among the quaternary mixtures, the soil formulation + 6% cement + 6% lime and 4% CR showed the best performance, exceeding the minimum compression strength of 2 MPa recommended by Norma, after 120 days of cure. Based on the results obtained, it is possible to conclude that, from a technical and economic point of view, the replacement of cement by lime in soil-cement bricks is viable, with the benefits of incorporating RC and observing the necessary for the effective hydration of the binders and the pozzolanic reactions.

Keywords: Construction; mechanical resistance; durability; microstructure.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”.

Carl Jung

Dedico este trabalho a Deus, pois foi seu amor incondicional e seu cuidado para comigo que tornaram possível alcançar esse objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeira e primordialmente a Deus que me concedeu, muito mais que a vida, e que esteve sempre comigo, ensinando-me a melhor maneira de vivê-la. Obrigada por tudo!

Ao meu orientador Prof. Dr. Wilson Acchar, por ter-se prontificado a compartilhar sua experiência e seu conhecimento ao longo da construção desse trabalho;

Ao meu coorientador, Prof. Dr Vamberto Monteiro da Silva, por tanto conhecimento compartilhado. Pela colaboração de forma efetiva, pela paciência e dedicação;

Às professoras Dr^a Jaquélia Brito e Dr^a Andreza Nóbrega por se disporem a agregarem seus conhecimentos e contribuir com a melhoria deste trabalho;

Aos colegas João Batista e Ricardo pela parceria e colaboração que tanto contribuíram para que esse objetivo fosse alcançado;

Aos meu pais, Fabíola e Neuridan, e à minha irmã, Lara, pela compreensão, pelo apoio e, sobretudo, pelo incentivo quando as dificuldades quiseram falar mais alto. Vocês são minha inspiração e minha principal razão para perseverar;

A Renato Reis pelo companheirismo imensurável. Pela paciência e pelo apoio quando as responsabilidades acadêmicas trouxeram momentos de ausência e tantas outras dificuldades. Essa conquista é quase tão sua quanto minha. Obrigada por ser você;

Ao meu amigo Ruan Landolpho pela parceria que tanto tem me acrescentado. Por estar sempre disposto a contribuir (e fazê-lo com muito afinco e muita sabedoria). Pelo ser humano incrivelmente solícito e humilde que é e que me ensina coisas boas dia-a-dia;

Ao técnico do laboratório de Construção Civil da UFRN, Sandro Ricardo, sempre muito solícito e competente ao auxiliar na realização dos ensaios para essa pesquisa;

Ao Laboratório de Caracterização Microscópica pela realização dos ensaios de FRX, DRX e MEV, de grande importância para que o objetivo dessa pesquisa fosse alcançado;

À CAPES pela concessão de bolsa durante parte da realização deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
Introdução e relevância da pesquisa.....	1
1.1. Objetivos da pesquisa.....	3
1.1.1. Objetivo Geral	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2	5
Revisão bibliográfica	5
2.1. Solos	6
2.1.1. Definição	6
2.1.2. Laterização dos solos.....	7
2.1.3. Estabilização dos solos	10
2.2 Aglomerantes	12
2.2.1 Cimento Portland	12
2.2.2 Cal.....	14
2.3. Resíduos de Construção e Demolição	16
2.3.1. Origem e composição.....	16
2.3.2. Reciclagem	18
2.3.2 Resíduo cerâmico	21
2.4. Atividade pozolânica	24
2.5. Durabilidade	25
2.5 Pesquisas acerca da fabricação de tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduos em geral e aplicações de resíduo cerâmico	26
CAPÍTULO 3	30
Materiais e métodos.....	30
3.1. Matérias-primas.....	30
3.1.1. Solo.....	30
3.1.2. Cimento	30
3.1.3. Cal.....	31
3.1.4. Resíduo Cerâmico.....	31
3.1.5. Água.....	31
3.2. Métodos	32
3.2.1. Caracterização das matérias-primas	32
3.2.1.1. Análise granulométrica	32

3.2.1.2. Limites de Atterberg (LL e LP)	32
3.2.1.3. Massa específica do solo e do RC.....	33
3.2.1.4. Teste de retração	33
3.2.2. Ensaio tecnológicos (físicos e mecânicos)	33
3.2.2.1. Ensaio de compactação.....	33
3.2.3 Composições	34
3.2.3.1. Moldagem e cura dos tijolos maciços	35
3.2.3.2. Ensaio de resistência à compressão simples.....	36
3.2.3.3. Ensaio de absorção de água	36
3.2.3.4. Ensaio de durabilidade modificada	37
3.2.3.5. Análise química e mineralógica das matérias-primas.....	38
3.2.3.6. Análise mineralógica das composições solo-aglomerante(s) e RC	38
3.2.3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura	39
CAPÍTULO 4	40
Resultados e discussões.....	40
4.1 Análise química e mineralógica das matérias-primas.....	40
4.1 Resistência à compressão Simples	43
4.2 Absorção de água	46
4.3 Durabilidade modificada	49
4.4 Análise mineralógica das composições solo-aglomerante(s) e RC	53
4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	55
CAPÍTULO 5	62
Considerações finais	62
5.1 Conclusões.....	62
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	64
Referências	65

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 - Perfil esquemático da ocorrência de solos em ambiente tropical.	7
Figura 2.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura de um solo a) Laterítico b) Não-Laterítico.....	9
Figura 2.3 - Distribuição dos solos lateríticos em termos mundiais.....	9
Figura 2.4 - Ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro.	10
Figura 2.5 - Diferentes estruturas granulométricas dos solos a) solo bem graduado b) graduação contínua c) graduação aberta.....	11
Figura 2.6 - Silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio.....	13
Figura 2.7 - Consumo de cimento anual no Brasil.....	14
Figura 2.8 - Resíduos da construção e demolição civil às margens dos corpos hídricos.....	21
Figura 2.9 - Produção ceramista nacional.....	22
Figura 2.10 - Composição dos RCD que chegam às usinas.....	23

Capítulo 3

Figura 3.1 - Ponto de coleta do resíduo cerâmico utilizado na pesquisa	31
Figura 3.2 - Fluxograma representativo do programa experimental.....	34
Figura 3.3 - Prensagem de tijolo maciço utilizando prensa manual.	36

Capítulo 4

Figura 4.1 - DRX do solo.....	41
Figura 4.2 - DRX da cal.....	41
Figura 4.3 - DRX do cimento Portland.....	42
Figura 4.4 - DRX do RC	43
Figura 4.5 - RCS dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento + RC.....	44
Figura 4.6 - RCS dos tijolos de solo-cal e solo-cal + RC.....	45
Figura 4.7 - RCS dos tijolos de solo-aglomerantes + RC.....	45
Figura 4.8 - RCS dos tijolos para todas as formulações produzidas	46
Figura 4.9 - AA dos tijolos para todas as formulações produzidas.....	47
Figura 4.10 - AA dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento + RC.....	48
Figura 4.11 - AA dos tijolos de solo-cal e solo-cal + RC.....	48
Figura 4.12 - AA dos tijolos de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal + RC.	49
Figura 4.13 - Perda de massa dos tijolos para todas as formulações produzidas.....	50
Figura 4.14 - Perda de massa dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento + RC.	51
Figura 4.15 - Perda de massa dos tijolos de solo-cal e solo-cal + RC.	51
Figura 4.16 - Perda de massa dos tijolos de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal + RC.....	52
Figura 4.17 - DRX da formulação S12C.....	53
Figura 4.18 - DRX da formulação S12C4RC.....	54
Figura 4.19 - DRX da formulação S6C6CHRC.....	54
Figura 4.20 - DRX da formulação S12CH4RC	55
Figura 4.21 - Micrografia da formulação S12C.....	56
Figura 4.22 - Micrografia da formulação S6C6CH4RC	56
Figura 4.23 - Micrografia da formulação S12CH4RC	57

LISTA DE TABELAS**Capítulo 2**

Tabela 2.1 - Composição do RCD de algumas cidades brasileiras.....	23
--	----

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Nomenclaturas das composições que serão produzidas na pesquisa ..	35
--	----

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Composição química do solo, aglomerantes e RC.....	40
Tabela 4.2 - Especificações químicas e físicas dos materiais pozolânicos conforme NBR 12653/2014 e do RC.....	42
Tabela 4.3 - Resistência à compressão simples (MPa)	43
Tabela 4.4 - Absorção de água	47
Tabela 4.5 - Perda de massa	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de Água
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CH	Cal hidratada
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
hab	Habitante
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
PMN	Prefeitura Municipal de Natal
RC	Resíduo Cerâmico
RCD	Resíduo de construção e demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
RN	Rio Grande do Norte
URBANA	Companhia de Serviços Urbano de Natal

CAPÍTULO 1

Introdução e relevância da pesquisa

No Brasil, refletindo o cenário produtivo mundial, a indústria da construção civil é apontada como uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social do país, uma vez que viabiliza um incremento na quantidade de empregos disponíveis, melhorando a renda da população economicamente ativa e ainda viabilizando a aquisição da moradia que constitui um direito básico do cidadão, assegurado no artigo 6º da Constituição Federal (SILVA, 2013). Por outro lado, a expansão desordenada desse setor produtivo, um fato comumente observado, tem gerado uma grande quantidade de resíduos que, por sua vez, provocam sérios danos ao meio ambiente. Esses impactos ambientais negativos decorrem do uso irracional dos recursos naturais disponíveis, porém limitados, contrariando os princípios básicos do desenvolvimento sustentável.

A construção civil consome cerca de 20% a 50% de todos os recursos naturais disponíveis (Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS, 2017). Esse dado posiciona o setor como o maior consumidor individual de recursos naturais. Os impactos causados são visíveis e revelam um sério comprometimento da qualidade do ambiente e da paisagem local, o que traz a importante necessidade de desenvolvimento de novas técnicas de reutilização e reciclagem dos resíduos produzidos e, ainda pela motivação, ao setor para que seja reduzido o desperdício proveniente do uso irracional dos recursos.

Além disso, Pinto (1999) estimou que o setor é responsável pela geração de cerca de 54% a 70 % de todo o resíduo sólido urbano, o que faz da construção, uma atividade significativamente degradante e cujos impactos precisam ser minimizados.

Nesse contexto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de verificar a viabilidade de empregar os resíduos produzidos pela construção civil como matéria-prima para a fabricação de novos materiais utilizáveis, reinserindo-os na própria cadeia produtiva da construção. Isso possibilita uma destinação final dos resíduos de maneira adequada, evitando seu descarte no meio ambiente e,

simultaneamente, reduzindo a necessidade de exploração dos recursos naturais necessários para a fabricação dos insumos convencionais utilizados na construção.

Tem-se, portanto, intensificado o emprego de alguns resíduos provenientes da construção e demolição, cujas propriedades pozolânicas viabilizam a fabricação de materiais largamente utilizados pelo setor como argamassas, concretos, tijolos de solo-cimento e solo-cal, entre outros. O uso de resíduos com propriedades pozolânicas configura uma atividade fortemente atrativa para a indústria da construção, por possibilitar a substituição dos aglomerantes convencionais, a exemplo do cimento. A fabricação desse material, envolve um altíssimo consumo energético, resultando em um custo final elevado, e emissão de grandes quantidades de CO₂ na atmosfera.

De posse das informações apresentadas, fica clara a importância das pesquisas cujo objetivo é reutilizar resíduos provenientes da construção civil, reduzindo as quantidades de entulho descartadas inadequadamente. Essa reutilização, além da contribuição à prática da sustentabilidade na construção civil, ainda pode trazer benefícios técnicos no sentido de melhorar as propriedades dos materiais, como durabilidade e resistência mecânica.

Desde os primórdios da história da humanidade é possível observar a utilização do solo como material de construção. Isso tem ocorrido devido a dois motivos, basicamente – por se tratar de um material abundante na natureza e pelo baixo custo envolvido em sua utilização (LIMA, 2010). É comum adicionar ao solo, alguns aditivos, como a cal, no intuito de melhorar seu comportamento a fim de atribuir ao material, diversas aplicações viáveis na construção civil.

A partir da mistura de solo, cal e água é possível produzir tijolos, cuja resistência mecânica é semelhante à dos blocos cerâmicos convencionais e cujo processo de fabricação é significativamente simples, envolvendo equipamentos pouco complexos e de baixo custo, resultando na redução do valor final do produto. Além disso, a produção de tijolos de solo-cal dispensa a etapa de sinterização, que além de ser responsável pela emissão de gases poluentes, ainda eleva o valor final do produto devido ao custo associado à energia necessária para o processo de queima.

Quando finamente moídos, os resíduos da construção civil podem apresentar propriedades cimentícias e serem reativos, contribuindo com o ganho de resistência mecânica dos materiais. São denominados materiais pozolânicos, cuja identificação

é uma tarefa complexa, devido à imprecisão dos parâmetros que caracterizam essa propriedade.

Os tijolos de solo-cimento e solo-cal, ambos incorporados com resíduo cerâmico, podem promover a ocorrência da reação pozolânica, uma vez que estão presentes óxidos de sílica e alumina, na forma desorganizada (não cristalina), tanto no solo intemperizado, como no resíduo cerâmico. Estes poderão recombina-se com o hidróxido de cálcio proveniente da cal e/ou decorrente da hidratação cimentícia, contribuindo para a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Com base no exposto e tendo em vista a ampla disponibilidade do calcário – principal matéria-prima para a produção de cal - na região Nordeste do Brasil e da geração de resíduos cerâmicos, provenientes da quebra de blocos empregados na execução de alvenarias na construção, este trabalho justifica-se por avaliar o potencial de substituição do cimento por um aglomerante menos poluente e abundantemente disponível, constituído pela cal, e ainda, sobre a viabilidade de incorporação do resíduo cerâmico, que é gerado em grande quantidade pela construção civil como forma de propiciar destinação adequada e, possivelmente, alcançar melhorias das propriedades físicas e mecânicas dos tijolos produzidos.

1.1. Objetivos da pesquisa

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com e sem incorporação de resíduo cerâmico.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar as matérias-primas convencionais (solo, cimento, cal hidratada) e o RC;
- Avaliar o comportamento físico e mecânico das misturas de solo-cal e solo-cal-cimento, com adição do resíduo cerâmico, em tijolos maciços, através de ensaios de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade modificada;

- Analisar a microestrutura de amostras dos tijolos maciços de solo-cal, solo-calcimento com a incorporação do RC, por meio de ensaios de Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Analisar a relação custo/benefício referente à produção de tijolos maciços a partir das formulações produzidas, quando comparado ao tijolo cerâmico convencional existente no mercado local.

CAPÍTULO 2

Revisão bibliográfica

A construção civil configura um setor industrial notadamente essencial para o desenvolvimento econômico do país, uma vez que gera mais de 2,3 milhões de empregos diretos e indiretos. Por outro lado, é apontada como uma das indústrias que mais consome os recursos naturais disponíveis. Esse consumo se dá, desde a fabricação dos insumos utilizados, passando pela fase de execução das obras e, posteriormente, durante sua utilização que se dá ao longo de décadas. Segundo o Portal da Arquitetura, Engenharia e Construção no Brasil, a construção civil utiliza aproximadamente 75% dos recursos extraídos do meio ambiente (AEC, 2016).

Segundo Nagalli (2016), a construção civil brasileira vem desempenhando importante papel na economia nacional ao longo dos últimos anos. Atualmente, o setor é responsável por 15% do Produto Interno Bruto – PIB - brasileiro e isso o torna um dos setores produtivos mais importantes do país. No entanto, a geração de Resíduos de Construção e Demolição – RCD – também vem recebendo atenção especial por parte de construtores, estudiosos e órgãos governamentais no Brasil e no mundo. Isso porque as atividades da construção civil configuram uma das maiores geradoras de resíduos sólidos em todo o planeta.

Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2012) apontam que em 2012, cerca de 55% de todo o resíduo sólido urbano gerado no Brasil era proveniente de RCD. Isso equivale a 35 milhões de toneladas de resíduo coletadas naquele ano. Já no panorama referente a 2015 esse número aumentou para 45 milhões de toneladas e já representava um crescimento de 1,2% em relação ao ano anterior, ou seja, 2014, segundo a Associação. Ainda segundo a ABRELPE, em 2015 o RCD gerado na região Nordeste do Brasil representava aproximadamente 20% do total gerado no país.

Em 2016 os municípios brasileiros coletaram cerca de 45,1 milhões de toneladas de RCD. Vale destacar a importância desses dados, ao considerar que a quantidade total de entulho produzido é ainda maior que a coletada, uma vez que

os municípios, de maneira geral, coletam apenas os resíduos que são lançados ou descartados nos logradouros públicos.

Além disso, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS (2014) indica que, dado o elevado consumo de recursos naturais pela indústria de materiais de construção, o setor fica limitado a empregar materiais abundantes no planeta e de baixo custo. Isso torna improvável a substituição radical dos materiais mais utilizados atualmente, baseados em silício, alumínio, ferro e cálcio.

Segundo Lucas *et al.* (2016) uma importante alternativa pode estar na reutilização de materiais cuja vida útil já foi encerrada, reinserindo-os na própria cadeia produtiva de construções futuras. Os autores afirmam, ainda, que o RCD faz parte do grupo de resíduos que podem ser reutilizados na indústria da construção.

Nesse contexto percebe-se a importância do desenvolvimento de métodos que viabilizem a utilização do RCD na própria construção, como forma de minimizar os impactos causados pela indústria. Dessa forma, a produção e o emprego de tijolos de solo-cimento e/ou solo-cal com incorporação de resíduo cerâmico pode ser uma alternativa viável econômica e tecnicamente para contribuir com a mitigação dos problemas supracitados.

A fabricação de tijolos de solo-cimento vem ganhando relevância pelo potencial de utilização de resíduos de diversas naturezas. A seguir, apresentam-se importantes definições a cerca dos insumos empregados na produção de tijolos de solo-cimento-cal, além do resíduo cerâmico utilizado nas formulações desenvolvidas nesta pesquisa.

2.1. Solos

2.1.1. Definição

Do ponto de vista da Mecânica dos Solos, os solos consistem em material particulado em cujos espaços intermediários há a presença de água - ou outro líquido - e ar. Todos os solos são resultado da ação do intemperismo sobre as rochas que, inicialmente compunham a crosta terrestre. A decomposição dessas rochas, que resulta da ação de agentes físicos e químicos, originou as partículas que atualmente compõem os mais diversos tipos de solos existentes (PINTO, 2006).

Caputo (2011) indica que os solos são resultantes do intemperismo das rochas que ocorre por desintegração mecânica, pela ação de agentes como água,

temperatura, vegetação e ventos, ou decomposição química, que ocorre fundamentalmente pela ação da água. Esta, por sua vez, desencadeia as reações de oxidação, hidratação e carbonatação que constituem os principais agentes do ataque químico promovendo modificações químicas ou mineralógicas sobre as rochas originárias.

Ortigão (2007) afirma que os solos provem do processo de deterioração das rochas que acontece por meio do chamado intemperismo, a ação do tempo. O intemperismo está dividido em dois grandes grupos – o intemperismo químico e o físico. O primeiro relaciona-se com a ação química dos agentes que promovem a alteração, a solubilização e a deposição dos minerais de rochas, que as transformam em solo. Por ser mais comum em regiões de clima quente e úmido, o autor afirma que esse tipo de intemperismo ocorre frequentemente no Brasil. O intemperismo físico é caracterizado pela ação de agentes como água, vento e variações térmicas que exercem uma ação mecânica de desagregação das rochas e transformam-nas em solo. De modo geral a ação do intemperismo ocorre pela ação simultânea de vários agentes.

2.1.2. Laterização dos solos

A ocorrência de solos em regiões tropicais reúne uma série de particularidades que resultam dos fatores climáticos e ambientais característicos dessas áreas. Os solos encontrados nas zonas tropicais são os solos lateríticos, saprolíticos e transportados (Figura 2.1), dos quais se destacam os lateríticos e saprolíticos (VILLIBOR *et al.*, 2009).

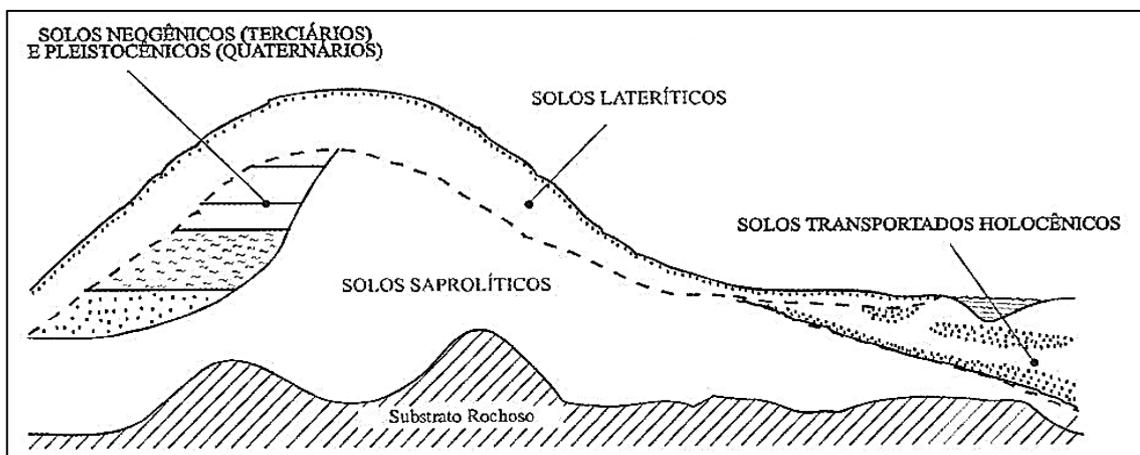


Figura 2.1 - Perfil esquemático da ocorrência de solos em ambiente tropical.
Fonte: Villibor *et al.* (2009).

No início do século XIX, na década de 1800, o termo “laterita” foi criado por Buchanan para nomear um material ferruginoso resultante da alteração da rocha granítica, na região chamada Malabar, na Índia. Tratava-se de um material que, após ser retirado da jazida e passar pelo processo de endurecimento quando exposto ao ar, podia ser cortado em forma de blocos e era utilizado em obras de construção civil como tijolo. Do latim, later, significa tijolo. A partir daí definiu-se o termo laterita.

Villibor *et al.* (2009) indicam que o processo de laterização dos solos imprime-lhe características peculiares e importantes do ponto de vista da engenharia como o enriquecimento do solo por óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a ocorrência da caulinita como argilomineral predominante e geralmente, exclusivo. Exatamente devido aos minerais predominantes nos solos lateríticos, estes apresentam coloração em tons de vermelho, amarelo, marrom ou laranja.

Santos e Parreira (2015) confirmam que no processo de laterização comum nas regiões tropicais úmidas, ocorre a lixiviação de cátions básicos e como consequência disso, tem-se uma concentração residual de óxidos de ferro e alumínio. Por isso, a fração argilosa dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. A combinação desses compostos resulta na formação de agregações estáveis em presença de água, devido ao recobrimento dos argilominerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados que reduzem a capacidade de adsorção de água pelos argilominerais e, ainda, atuam como agentes cimentantes naturais entre as partículas. Por isso, conforme micrografia abaixo, verifica-se que, no caso do solo laterítico, as partículas menores encontram-se aglomeradas (Figura 2.2.a), o que não se observa na microestrutura do solo não-laterítico (Figura 2.2.b). Isso demonstra as características cimentantes atribuídas aos solos lateríticos, conforme cita a literatura.

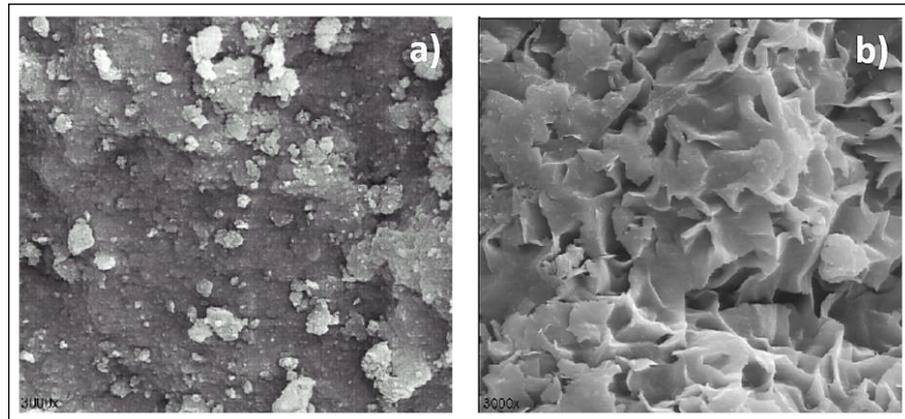


Figura 2.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura de um solo a) Laterítico b) Não-Laterítico.

Fonte: Adaptado de Takeda (2006).

Os solos lateríticos, após compactação adequada, adquirem comportamento de grande relevância como a alta capacidade de suporte e reduzida perda dessa mesma capacidade quando condicionado à imersão em água. Em termos geográficos, os solos lateríticos estão situados geralmente, na faixa do planeta denominada intertropical, em regiões cujas condições climáticas favorecem à ação intensa e rápida do intemperismo, com altas temperaturas, chuvas abundantes, elevada umidade e percolação de água (BERNUCCI, *et al.* 2006).

Segundo Santos e Parreira (2015) estima-se que pelo menos 8,1% do território dos continentes é ocupado pelos solos lateríticos. A Figura 2.3 ilustra a ocorrência dos solos lateríticos em termos mundiais.

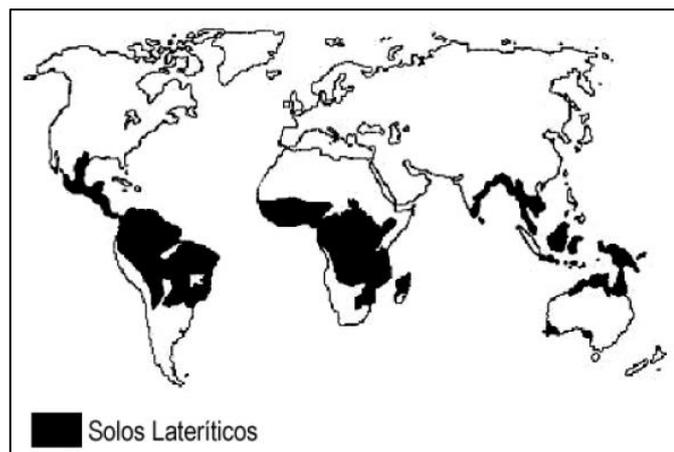


Figura 2.3 - Distribuição dos solos lateríticos em termos mundiais.

Fonte: Charman (1988) *apud* Bernucci (1995).

No Brasil, esse tipo de solo encontra-se distribuído em quase todo o território, como discrimina a Figura 2.4 a seguir.

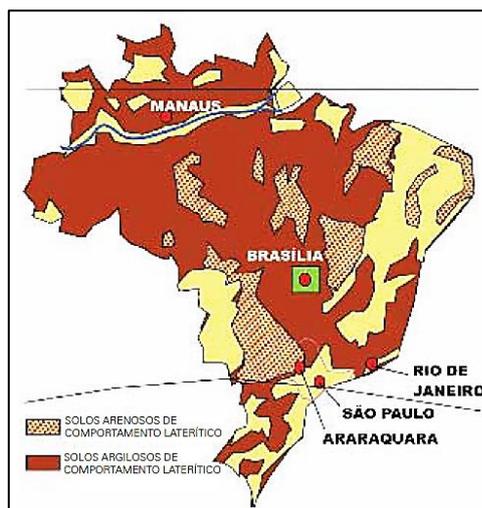


Figura 2.4 - Ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro.

Fonte: Villibor *et al.* (2009)

Com base na Figura 2.4 e no que afirma Silva (2013), verifica-se que no estado do Rio Grande do Norte, predomina a ocorrência dos latossolos vermelho-amarelo, que constituem solos não hidromórficos desenvolvidos em zonas de oxidação, com boas condições de drenagem, não afetado por lençol freático, muito profundos, porosos, com baixa densidade, alta permeabilidade no estado natural, boa resistência à erosão e boa capacidade de armazenamento de água.

2.1.3. Estabilização dos solos

O processo de estabilização confere ao solo maior resistência e estabilidade frente à aplicação de carregamentos e à erosão. Isso se dá através de ações como compactação, correção granulométrica e de plasticidade ou de adição de substâncias aglutinantes que conferem coesão entre as partículas que o constituem (GÓIS, 2012).

Gidigasu (1972) apud Tan (2016) afirma que os solos lateríticos, que são muito comumente encontrados pelo mundo em regiões de clima tropical úmido, configuram um tipo de solo rico em óxidos como os de ferro e alumínio e podem apresentar comportamento geotécnico bastante variável.

Para Tan (2016) o uso desse tipo de solo pode ser inadequado para materiais de construção de vedação devido ao alto teor de água existente e sua sensibilidade à umidade. No entanto, um método comum para estabilização de solos lateríticos é a adição de cal e/ou cimento.

Muitas vezes, o solo como encontrado na natureza não apresenta o comportamento esperado para determinado fim, gerando a necessidade de adição de algum aglomerante para melhorar suas propriedades. Segundo Wang (2016) o tratamento com cal trata-se de uma técnica amplamente empregada para alcançar o melhoramento de solos utilizados na construção civil.

Ojuri *et al.* (2016) confirmam que a estabilização de solos trata-se de uma técnica bastante utilizada com a finalidade de melhorar as características naturais dos solos, de forma que eles atinjam as especificações necessárias para o uso que lhe será atribuído. Segundo os autores, o cimento e a cal são os principais materiais empregados para tal estabilização.

Os tipos de estabilização de solos estão divididos em três categorias básicas compreendidas pela estabilização mecânica, granulométrica e por adição de aglomerantes.

Na estabilização mecânica, a granulometria do solo é conservada ou corrigida, antes da compactação, que objetiva aumentar a coesão entre as partículas do solo. Pinto (2006) afirma que a compactação de um solo consiste em imprimir-lhe uma determinada energia, sob condições de umidade ideais para reduzir o atrito interno e viabilizar a eliminação de vazios, a fim de atingir uma determinada densidade.

A estabilização granulométrica consiste na introdução de frações de diferentes granulometrias provenientes de areias, siltes e argilas, promovendo o melhor empacotamento entre as partículas. Com isso é possível transformar uma porção de solo de graduação contínua (Figura 2.5.b) ou de graduação aberta (Figura 2.5.c) em um solo denominado bem graduado (Figura 2.5.a).

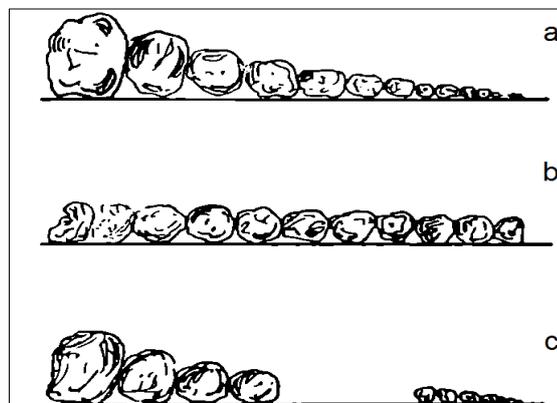


Figura 2. 5 - Diferentes estruturas granulométricas dos solos a) solo bem graduado b) graduação contínua c) graduação aberta.

Fonte: Adaptado de CAPUTO (2011).

A estabilização química é o processo pelo qual adiciona-se ao solo, determinados percentuais de aglomerantes como cal, cimento, betume, etc. a fim de aglutinar as partículas do solo, aumentar a coesão interna, reduzir a porosidade e a permeabilidade e aumentar a resistência mecânica (CAPUTO, 2011).

Além desses, é importante mencionar a estabilização físico-química dos solos que associa a ação mecânica da compactação reduzindo o volume de seus vazios e tornando-o mais estável, com a ação aglutinante dos aglomerantes adicionados em certos teores aos solos e que iniciado o processo de hidratação, desencadeia reações cimentícias e pozolânicas que, por sua vez, origina compostos hidratados que promovem o aumento da resistência do solo tratado.

Esse último sistema de estabilização de solos pode ser exemplificado pelas misturas de solo-cimento e solo-cal, juntamente com a incorporação de resíduos com certa pozolanicidade a estas composições.

2.2 Aglomerantes

2.2.1 Cimento Portland

A ASTM C 150/2002 e Mehta & Monteiro (2014, p. 207) definem cimento Portland:

Um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado que é produzido quando uma mistura de matérias-primas de composição pré-determinada é aquecida em altas temperaturas.

Trata-se, portanto, de um material com propriedades aglutinantes, cujo endurecimento se dá a partir do contato com água e, após endurecido, oferece certa impermeabilidade e boa resistência à ação da água.

O cimento Portland é amplamente utilizado pela indústria da construção civil com a finalidade de conferir propriedades de resistência e durabilidade aos materiais de construção. Constituído, basicamente, de compostos de silicatos e aluminatos, mediante processo de hidratação, o cimento produz os chamados compostos hidratados (Figura 2.6), tais como o silicato de cálcio hidratado (CSH), o hidróxido de

cálcio (CH) – também chamado portlandita e o sulfoaluminato de cálcio, além dos grãos de clínquer não hidratados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O CSH constitui a principal fase sólida de uma pasta de cimento Portland hidratada. É o principal responsável pelo ganho de resistência mecânica e durabilidade dos compósitos cimentícios. Segundo Mehta e Monteiro (2014) isso se deve, basicamente à sua morfologia, em camadas, que resulta em uma elevada área superficial. Comparado ao CSH, o hidróxido de cálcio contribui consideravelmente menos, em termos de resistência, o que pode-se justificar devido à sua área superficial significativamente menor. Os sulfoaluminatos de cálcio, por sua vez, desempenham um papel secundário nas relações microestrutura-propriedades de uma pasta de cimento hidratada.

O cimento é um material de elevada finura constituído da combinação de clínquer e gesso e cuja produção demanda alto nível de energia térmica (EL-ATTAR *et al.*, 2017). A fabricação de uma tonelada de cimento Portland requer cerca de 60 a 130 kg de óleo combustível ou equivalente e aproximadamente 110 KW/h de eletricidade (Felekoğlu *et al.*, 2007). Segundo Marku *et al.*, (2012) esse processo utiliza ainda, cerca de 2,8 toneladas de matérias-primas entre combustíveis e insumos.

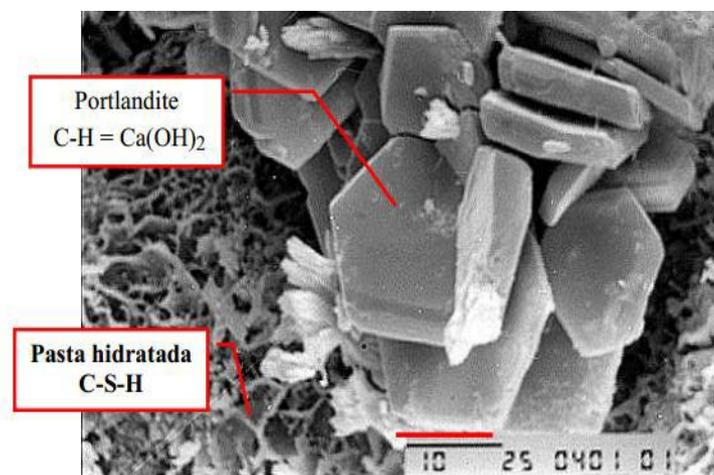


Figura 2.6 - Silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio.
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

A produção do cimento também é apontada como uma das atividades mais poluentes para o meio ambiente. Estima-se que cerca de 0,9 a 1,1 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) são lançadas na atmosfera a cada tonelada de cimento produzida. Tendo em vista que o dióxido de carbono se trata de um dos principais

gases de efeito estufa, infere-se que a produção cimentícia é uma atividade fortemente degradante constituindo importante preocupação em relação ao processo de aquecimento global (EL-ATTAR *et al.*, 2017).

Apesar de se tratar de um material fortemente degradante, o cimento Portland é um dos mais utilizados pela indústria da construção civil. Como mostra a Figura 2.7, entre os anos de 2004 e 2014, o consumo de cimento no Brasil passou de aproximadamente 40.000 ton/ano para aproximadamente 71.000 ton/ano.

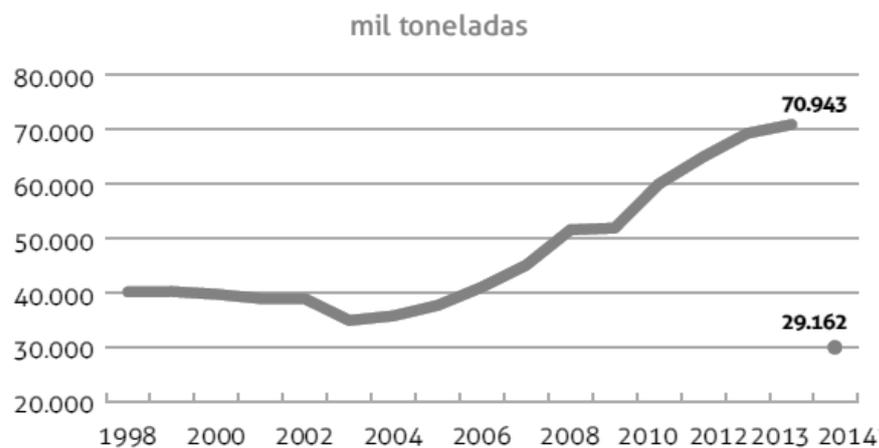


Figura 2.7 - Consumo de cimento anual no Brasil.

Fonte: Adaptado de SNIC (2014).

Com base nisso vale ressaltar a importância da busca por materiais alternativos que, ao mesmo tempo, atendam às necessidades da construção civil em termos técnicos e econômicos e permitam a redução do consumo de cimento Portland, a fim de minimizar os impactos ambientais associados ao seu uso e contribuir com a promoção de um desenvolvimento mais sustentável no âmbito da construção civil.

2.2.2 Cal

Guimarães (2002) afirma que a humanidade conheceu a cal provavelmente no período Paleolítico, também conhecido por Idade da Pedra, havendo evidências do uso da cal ao longo de toda escala evolutiva da espécie humana. O autor afirma, ainda, que a cal passou a ser empregada efetivamente nas construções pela civilização egípcia, que detinha amplo conhecimento sobre seu manuseio. Há

registros de sua utilização em diversas obras da antiguidade como a pirâmide de Quéops, no Egito, as muralhas de Jericó e da China e a Via Ápia em Roma.

Os primeiros registros da utilização da cal no Brasil datam de 1549, quando o governador Tomé de Souza, fundou a primeira mineração de calcário para fabricação de cal virgem, que seria empregada nas argamassas para construção do casario da cidade de Salvador (GOIS, 2012). Outros registros demonstram a importância do beneficiamento do calcário para utilização da cal em argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias em cidades coloniais como Ouro Preto/MG, Paraty/RJ e Olinda/PE (SILVA, 2013).

A descoberta do cimento Portland e ampliação de sua fabricação motivou uma notável redução da utilização de cal, principalmente devido ao seu processo produtivo de baixo controle e bastante artesanal que resulta no questionamento da qualidade do produto fabricado.

No entanto, a cal ainda se trata de um produto amplamente utilizado pelas indústrias siderúrgicas, de papel e celulose, farmacêutica e alimentícia. Utiliza-se ainda, a cal, no tratamento de água para controle do pH e para o tratamento de solos.

A fabricação da cal, também chamada, óxido de cálcio envolve as etapas de extração do calcário, moagem e sinterização do mesmo em fornos industriais à altas temperaturas, processo também denominado calcinação, que origina o óxido de cálcio (CaO) e o gás carbônico (CO₂). Essa decomposição térmica pode ser expressa pela seguinte equação:



O produto dessa calcinação, a chamada cal viva, contém, predominantemente, óxidos de cálcio, apresenta-se com estrutura porosa que assemelha-se à rocha original e aparece na forma de grãos cujas dimensões variam de acordo com o processo de fabricação empregado, variando comumente de 10 cm a 20 cm de diâmetro. Trata-se das chamadas pedras de cal viva (BAUER, 2000).

Para obtenção da cal hidratada promove-se a reação entre a cal viva e água em que há liberação de calor, configurando a seguinte reação exotérmica:



Nessa etapa inicia-se simultaneamente a hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio. No entanto, a cinética de hidratação dos óxidos de cálcio é mais acelerada e em torno das suas partículas forma-se uma solução supersaturada. Nesse meio formam-se íons Ca^{++} e OH^- , em proporções que são determinadas pela estrutura cristalina do óxido e pelos níveis de temperatura atingidos na reação. Finalmente, com um número suficiente de íons, inicia-se a formação e cristalização do hidróxido de cálcio, a cal hidratada, enquanto a hidratação do óxido de magnésio prossegue com cinética mais lenta (GUIMARÃES, 2002).

2.3. Resíduos de Construção e Demolição

A Resolução Nº 307, de 05 de julho de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (CONAMA, 2002) define como Resíduos de Construção e Demolição, todos aqueles que resultam de construções, demolições, reformas e reparos, comumente denominados metralha ou entulho de obras. Tem-se, ainda, aqueles que provêm da preparação e escavação de solos, blocos e telhas cerâmicas, concretos, argamassas, solos, rochas, madeiras, vidros, etc.

2.3.1. Origem e composição

A geração e destinação final dos resíduos sólidos tem sido uma preocupação crescente em todo o mundo, e isso tem-se intensificado nos últimos anos, à medida que os dados demonstram índices de geração de resíduos cada vez mais expressivos. Nesse contexto Pinto (1999), John (2001) e Ângulo (2005) citam que os RCD chegam a representar mais de 50% do total (em massa) dos resíduos sólidos urbanos.

Segundo Corinaldesi (2012) na União Europeia a produção de RCD ultrapassa os 180 milhões de toneladas/ano. John (2001) aponta que, apesar das variações na bibliografia internacional, estima-se que a geração de RCD varia entre 400 a 500 kg/hab.ano.

Nas últimas décadas, no Brasil, o crescimento urbano impulsionado, entre outros fatores, pelo grande déficit habitacional e de infraestrutura, tem sido associado a significativos índices de geração de resíduos pela construção civil (CARNEIRO *et al.*, 2001). Isso pode ser atribuído a fatores como vícios de execução de uma indústria que conta com técnicas arcaicas em seus processos, reformas ou

modernização de edificações, descarte de componentes que chegaram ao fim da vida útil e correções necessárias em obras (JONH E AGOPYAN, 2000).

Contreras *et al.* (2016) indicam que nesse ano a produção de RCD no Brasil foi superior a 70 milhões de toneladas, o que representa a maior parcela de resíduos sólidos urbanos (em massa).

No município de Natal/RN a Duarte Usina de Reciclagem de RCC registrou o recebimento de 89.400 m³ de RCC só em 2014. Considerando-se o peso específico médio considerado pela ABRECON para o resíduo, de 1.200 kg/m³, isso equivale a, aproximadamente, 107.280 toneladas de RCC. Em 2017 a Usina recebeu 158.275 m³ de resíduo, equivalente a 189.930 toneladas. Isso representa um crescimento de, aproximadamente 44% em três anos, o que justifica a preocupação em torno da gestão dos resíduos sólidos.

A Resolução Nº 307, de 05 de julho de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (CONAMA, 2002) define como resíduos da construção civil, todos aqueles que resultam de construções, demolições, reformas e reparos, comumente denominados metralha ou entulho de obras. Tem-se, ainda, aqueles que provém da preparação e escavação de solos, blocos e telhas cerâmicas, concretos, argamassas, solos, rochas, madeiras, vidros, etc.

O CONAMA classifica, por meio da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), os RCD em quatro classes. A Resolução nº 348 (CONAMA, 2004), altera a anterior incluindo o amianto na Classe “D” (resíduos perigosos). A Resolução nº 431 (CONAMA, 2011), altera a redação referente aos resíduos Classes B e C. Por fim, a Resolução nº 469 (CONAMA, 2015), altera a redação referente aos resíduos Classe B, incluindo as embalagens de tintas e vernizes, conforme pode ser observado a seguir:

- **Classe A:** são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como os que provém de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de demolição, de construção, reformas e reparos de edificações (componentes cerâmicos, como tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento); de processo de fabricação e/ ou demolição de peças pré-moldadas em concretos (blocos, tubos, meios-fios), produzidas nos canteiros de obras;

- **Classe B:** são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso (este último era, inicialmente incluso na classe C pela Resolução nº 307/2002);
- **Classe C:** são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- **Classe D:** são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Diferente, mas não conflitante com a Resolução CONAMA, a ABNT, por meio da NBR 10004/2004 Classifica o RCD da seguinte forma:

- **Classe I:** compreende os resíduos com características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, considerados, portanto, resíduos perigosos;
- **Classe II:** compreende os resíduos não perigosos que, por sua vez, subdividem-se em duas subclasses denominadas IIA (não inertes) e IIB (inertes).

Nota-se que na classe A estão inseridos os componentes cerâmicos, dos quais resulta o RC utilizado como parte do objeto de estudo desse trabalho.

Embora os RCD não sejam, em sua totalidade, considerados perigosos, sua geração delineia um sério problema cuja principal característica são os grandes volumes de entulho descartados de maneira aleatória e caótica no meio ambiente.

2.3.2. Reciclagem

A reciclagem é definida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), expressa por meio da Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010a) como sendo o processo que envolve a transformação física, química ou biológica dos resíduos

sólidos, conferindo-lhes condições de serem transformados em insumos ou novos produtos, desde que observadas as recomendações dos órgãos pertinentes.

Os primeiros registros de reciclagem dos RCD na construção civil, datam de 1946 quando foram utilizados na reconstrução das cidades devastadas pela Segunda Guerra Mundial, na Europa (WEDLER e HUMMEL, 1946 apud LEVY, 1997 apud OLIVEIRA, 2004). Em 1960, na Alemanha, produziu-se artefatos de concreto de cimento Portland utilizando agregados reciclados (VIEIRA e MOLIN, 2004). O processo de reciclagem e reinserção de resíduos na cadeia produtiva da construção, surgiu como alternativa para a reconstrução das cidades devastadas e os grandes volumes de entulhos que ficaram espalhados pelas cidades alemãs no período pós-Guerra.

A partir de então, a Europa passou a desenvolver importantes pesquisas acerca de reciclagem a fim de estabelecer parâmetros relacionados à produção de insumos reciclados de boa qualidade.

Silva (2014) aponta que em alguns países utiliza-se agregados reciclados, provenientes de resíduos da construção, limitando-se o uso apenas à execução de concretos com resistência de até 25 MPa e para pavimentação. Ainda nesse contexto, a Comunidade Europeia elenca países que reciclam quase 50% do RCD gerado, a exemplo da Finlândia, Áustria, Suécia e Inglaterra. Vale destacar países como Bélgica e Dinamarca que reciclam cerca de 80% do resíduo produzido.

Segundo Schneider (2003) a Dinamarca conseguiu maximizar a atividade de reciclagem que passou de 25% para 90% de todo o resíduo gerado, elevando a taxa cobrada para a disposição de RCD em aterros.

A Holanda regulamentou a triagem do RCD e posterior entrega do material às usinas de reciclagem, pela própria geradora do resíduo. Esse tipo de medida otimiza e acaba por impulsionar o processo de reciclagem. Segundo Silva (2014) no ano 2000 uma reformulação nas normas holandesas permitiu a utilização de agregados reciclados em concreto protendido. Com isso a Holanda passou a se destacar entre os países com os maiores índices de reciclagem, chegando a 90% de todo o entulho gerado.

De maneira geral, em países desenvolvidos, iniciativas como a imposição de taxas sobre o resíduo descartado em aterros e, ainda, o incentivo a usinas de britagem e reciclagem, em geral, de resíduos, são um conjunto de medidas adotadas

com o objetivo de minimizar a geração de entulho e ao mesmo tempo promover sua reciclagem.

No Brasil a reciclagem começou a ser praticada no início da década de 1990 quando instalou-se a primeira usina de reciclagem, na cidade de Itatinga/SP, com capacidade de reciclagem de 100 (cem) toneladas/dia. O material proveniente da usina era aplicado, inicialmente, como base na pavimentação de ruas e estradas (SILVA, 2013).

No entanto, até o ano de 2002 na legislação brasileira não havia uma regulamentação sobre os resíduos gerados na construção. Naquele ano, o Conselho Nacional do Meio Ambiente decretou a Resolução de nº 307 que estabelece critérios, diretrizes e procedimentos para a gestão dos RCD no Brasil.

Em 2010 foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei nº12.305 que subsidiaria a Resolução CONAMA 307. Com base no princípio da responsabilidade compartilhada, a Lei traz a associação entre os âmbitos ambientais, sociais e econômicos e torna responsáveis pela geração dos resíduos, todos os agentes envolvidos nos processos de fabricação, distribuição, venda e consumo.

No ano seguinte à aprovação da Lei, surge a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) com o objetivo de promover o aperfeiçoamento de projetos, leis e programas visando reutilizar e reciclar o RCD gerado, o que veio representar maior suporte às empresas de reciclagem como alternativa para o fortalecimento do setor. Desde então, a Resolução tem recebido importantes adequações que visam promover seu alinhamento com as deliberações trazidas pela Lei nº 12.305. Por exemplo, a Resolução nº 448 de 2012 destaca o gerenciamento dos resíduos como um conjunto de ações nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final de acordo com o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, exigidos pela Lei nº 12.305.

Atualmente, o Brasil desenvolve estudos que visam promover a reciclagem de resíduos, sobretudo dos RCD, com o objetivo de reduzir os custos na construção, otimizando os setores de habitação popular, pavimentação, saneamento e etc. Dessa forma é possível incentivar e regulamentar os processos de reciclagem, contribuindo com o desenvolvimento sustentável nas esferas econômica, social e ambiental.

No entanto, ainda é notável a necessidade da implementação de políticas públicas de incentivo à reciclagem mais eficientes e que tratem de questões recorrentes como é o caso da destinação inadequada dos resíduos (Figura 2.8) e da triagem dos mesmos pelos próprios geradores, afim de otimizar o trabalho das recicladoras e fortalecer a atividade.



Figura 2.8 - Resíduos da construção e demolição civil às margens dos corpos hídricos.

Fonte: URBANA (2015).

2.3.2 Resíduo cerâmico

A indústria de cerâmica vermelha no Brasil, segundo a ANICER (2016) é composta por 6.903 fábricas, gerando 293 mil empregos diretos, 900 mil indiretos e atinge um faturamento anual de 18 bilhões de reais, exercendo uma representatividade de 4,8% da construção civil. O setor produz, mensalmente, cerca de 4 bilhões de blocos e tijolos e 1,3 bilhões de telhas.

Ainda conforme a ANICER (2016) no Rio Grande do Norte, a indústria de cerâmica vermelha é composta por 186 empresas formalizadas, distribuídas em 42 municípios, empregando aproximadamente 6,4 mil trabalhadores e chega a movimentar anualmente, cerca de 208 milhões de reais.

Segundo o SEBRAE (2011) a indústria da cerâmica vermelha no Brasil é composta, em sua maior parte, por empresas de pequeno e médio porte.

A produção nacional ceramista divide-se entre as cerâmicas brancas, vermelhas e refratárias, das quais a produção de cerâmica vermelha é a mais representativa, conforme o gráfico da Figura 2.9 a seguir:



Figura 2.9 - Produção ceramista nacional.

Fonte: Adaptado de SEBRAE (2015).

Dadas as condições dos processos de fabricação de produtos de cerâmica vermelha no Brasil, de maneira artesanal e com baixo controle efetivo dos processos, as perdas ocorrem corriqueiramente e em quantidades significativas. Com isso, gera-se um grande volume de resíduo que, além de representar desperdício de matéria-prima e energia, ainda traz a necessidade de ocupação de grandes áreas no meio ambiente para que haja o descarte.

Após o processo de sinterização as perdas representam entre 5% e 20%, variando de acordo com o nível tecnológico existente em cada indústria. Diante da variabilidade do potencial tecnológico utilizado pela indústria de cerâmica vermelha no Brasil, pode-se considerar uma perda média de, aproximadamente 10%. Isso significa, em massa, o equivalente a 200 kg de resíduo gerado para cada duas toneladas de peças, massa aproximada para cada milheiro (MME, 2009).

Além das perdas mencionadas, que ocorrem ainda no âmbito da fabricação das peças, tem-se a parcela de quebra que acontece nas etapas de transporte, armazenamento e utilização na construção civil, maximizando os índices de geração de resíduo cerâmico.

Em geral, os RCD apresentam composição bastante variável e que, normalmente, é determinada pelo tipo de obra que originou o resíduo (construção ou reforma/demolição), pela fase da obra, tecnologia construtiva adotada e etc. (JOHN, 2000). No entanto, os resultados de pesquisas em algumas cidades do País,

demonstram uma predominância de concretos, argamassas e materiais cerâmicos como principais constituintes do RCD, conforme observa-se na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1 - Composição do RCD de algumas cidades brasileiras

Componentes	Salvador/ BA ¹ (%)	Maceió/ AL ² (%)	Porto Alegre/RS ³ (%)	Fortaleza/ CE ⁴ (%)	Campina Grande/PB ⁵ (%)	Natal/RN (%) ⁶
Concreto	53,0	27,82	44,2	15,0	10	62,30
Argamassa		18,65	18,3	38,0	28	
Cerâmica vermelha	9,0	48,15	35,6	13,0	34	28,90
Cerâmica Branca	5,0	3,06	0,10	11,0		
Solo e areia	22,0	-	1,80	9,0	9	-
Rocha	5,0	-	-	3,0		
Plástico	4,0	-	-	-	1	1,60
Outros	2,0	2,32	-	2,0	18	6,20

Fonte: Adaptado de ¹Carneiro *et al.* (2001); ²Vieira (2003); ³Lovato (2007); ⁴Oliveira *et al.* (2011); ⁵Nóbrega (2002); ⁶Silva Filho (2005).

A ABRECON (2016) aponta que, do RCD recebido pelas usinas de reciclagem no Brasil, em média, 11% é constituído por materiais cerâmicos e, do resíduo misto que compõe 69% do total de RCD, metade trata-se de material vermelho (cerâmica vermelha e componentes à base de argila) conforme o gráfico apresentado na Figura 2.10.

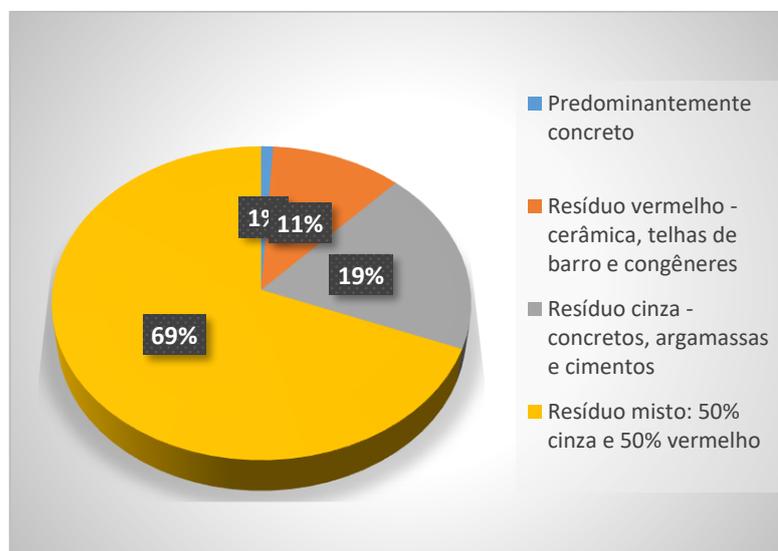


Figura 2.10 - Composição dos RCD que chegam às usinas.

Fonte: Adaptado de ABRECON (2016).

Alguns estudos, apontam que os resíduos de cerâmica vermelha, quando finamente moídos – normalmente trata-se do material passante na peneira de

número 200 da série Normal, promovem a ocorrência de atividade pozolânica em contato com cimento Portland e/ou cal, em presença de água.

2.4. Atividade pozolânica

Materiais pozolânicos são aqueles silicosos ou sílico-aluminosos que, individualmente, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, porém, quando finamente moídos e em presença de umidade reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes (MEHTA; MONTEIRO, 2014 e NBR 12653/2014). Assim, tem-se que a reação pozolânica ocorre fundamentalmente entre a pozolana e o hidróxido de cálcio. Segundo Mehta & Monteiro (2014) a reação, se desenvolve em velocidade lenta e, portanto, há baixa liberação de calor na hidratação e o desenvolvimento de resistência mecânica se dá de forma lenta.

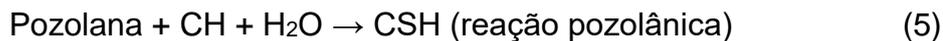
A NBR 12653/2014 – Materiais Pozolânicos classifica os materiais pozolânicos em três classes, como segue:

- Classe N: Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos dessa norma, a exemplo de terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- Classe C: Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedecem às prescrições dessa norma;
- Classe E: Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta Norma.

A NBR 12653/2014 estabelece determinadas exigências para que um material seja classificado como pozolânico. Quanto à composição química, a Norma exige que a quantidade de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ deve ser de, no mínimo, 70% para os materiais das classes N e C, e de pelo menos 50% para os da classe E.

De acordo com MEHTA (2008) a principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento Portland, como o C_3S e o C_2S . Essas reações podem ser descritas da seguinte forma:





onde:

C₃S = Silicato tricálcico;

C₂S = Silicato dicálcico;

CH = Hidróxido de cálcio;

CSH = Silicato de cálcio hidratado

Segundo Garcia *et al.* (2015) a reação pozolânica sofre importante influência pela granulometria do material que, quanto mais finamente particulado, maior a reatividade desenvolvida.

2.5. Durabilidade

A fabricação de qualquer material com finalidade de uso na construção civil precisa observar, não só seu comportamento mecânico, mas paralelamente a este, é necessário garantir que trata-se de um material durável, ou seja, que se comportará satisfatoriamente ao longo de sua vida útil, resistindo à ação agressiva do meio em que está inserido considerando a finalidade para a qual é requerido. Isso configura um importante requisito no que se refere à viabilidade de uso do material sugerido e, portanto, para sua aceitação e disseminação no mercado.

O American Concrete Institute – ACI 201 define durabilidade como a capacidade de resistir a ações como intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer processo de deterioração.

Segundo a ABNT NBR 6118/2014 durabilidade é a capacidade de resistir à ação das intempéries características do meio ambiente que, por sua vez, devem ter sido identificadas e consideradas na fase projetual de uma estrutura.

Mehta e Monteiro (2014) destacam a importância da durabilidade dos materiais construtivos por dois motivos principais. Primeiro, a proporção dos custos totais de uma obra, que podem aumentar consideravelmente com reformas e reparos devido à baixa durabilidade dos materiais de construção. Segundo, a estreita relação entre a durabilidade e a ecologia. Uma vez duráveis os materiais de construção, promove-se a conservação dos recursos naturais empregados em sua fabricação.

2.5 Pesquisas acerca da fabricação de tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduos em geral e aplicações de resíduo cerâmico

Materiais de construção à base de solos são utilizados em atividades construtivas há cerca de 9.000 anos em todo o mundo. A disseminação dessa prática pode ser explicada pela disponibilidade das matérias-primas necessárias, à simplicidade do processo de produção, às suas propriedades térmicas e acústicas satisfatórias e, ainda, à economia financeira envolvida (OTI *et al.*, 2010).

Nesse contexto, pesquisas tem sido desenvolvidas no Brasil e no mundo com a finalidade de otimizar o processo de fabricação, bem como a inserção desses materiais no mercado da construção civil. Tais estudos, à medida que comprovam a viabilidade técnica, social e econômica quanto ao uso de diferentes insumos na fabricação dos materiais, contribuem significativamente com a promoção de um desenvolvimento sustentável no âmbito da construção civil.

A seguir, apresenta-se alguns estudos científicos que avaliam o comportamento de tijolos fabricados com solo-cimento-resíduo e em que a sinterização não faz parte do processo de fabricação, uma importante característica dos tijolos de solo-aglomerante.

Ferreira *et al.* (2008) produziram tijolos de solo-cimento utilizando um solo de classificação AASHTO A4, cimento CP II F-32 com incorporação de dois resíduos vegetais, sendo eles casca de arroz e casca de braquiária. A partir dos resultados obtidos, infere-se que a substituição de 10% de resíduos vegetais em relação ao teor de cimento apresentou os melhores resultados, superando os valores recomendados para resistência a compressão simples e absorção de água. Os autores ainda concluíram que a adição da casca de arroz resultou em valores de resistência à compressão simples mais elevados do que os resultantes da adição de casca de braquiária, nos teores correspondentes, para todas as idades de cura.

Miranda *et al.* (2011) produziram tijolos de solo-cimento com adição de “grits”, resíduo sólido de características arenosas e coloração acinzentada, gerado pela indústria da celulose. As composições utilizadas foram 1:14:0; 1:10,5:3,5 e 1:7:7 de cimento, solo e grits, respectivamente. Os tijolos produzidos foram submetidos a ensaios de compressão simples e absorção. Todas as composições testadas apresentaram resistência à compressão superior a 2 Mpa, mínimo recomendado pelas Normas Brasileiras e essa propriedade mecânica cresceu à medida que

aumentou-se o teor de resíduo incorporado. A absorção também aumentou com o aumento do teor de resíduo, no entanto, em nenhum dos casos, esta ultrapassou o limite máximo estabelecido pelas normas.

Segantini e Wada (2011) produziram tijolos de solo-cimento utilizando um solo arenoso e cimento CP II Z 32, em cuja mistura incorporaram resíduo da construção e demolição (RCD) que continha restos de argamassa, solo, agregados, concreto, e materiais cerâmicos como tijolos e telhas. O teor de RCD inserido nas composições variou entre 0% e 100% em relação à massa de solo empregada. Após os períodos de cura estabelecidos, os tijolos foram submetidos a ensaio de compressão simples e absorção de água. Os resultados demonstraram que a utilização de 4% de cimento mais, pelo menos 20% de RCD resulta em resistências superiores à mínima recomendada para o emprego em alvenarias de vedação, ou seja, 2 Mpa.

Siqueira e Holanda (2013) utilizaram resíduos de grãos da indústria de celulose em substituição parcial ao cimento Portland na fabricação de tijolos de solo-cimento. Os tijolos fabricados foram submetidos a ensaios de compressão e absorção. Os resultados obtidos demonstram que, para teores de resíduo superiores a 20%, a absorção apresenta-se superior ao máximo recomendado de 20%. Todas as composições utilizadas apresentaram resistência à compressão superior a 5,0 Mpa, sendo a composição com 10% de resíduo, a que apresentou maior resistência (aproximadamente 5,85 Mpa).

Oliveira *et al.* (2014) fabricaram tijolos maciços de solo-cimento com incorporação de resíduos de tornearia mecânica. Todas as composições utilizaram 10% de cimento e três percentuais de resíduo (0%, 10% e 15%). Após prensagem manual e cura, os tijolos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples e absorção. Os resultados obtidos demonstraram que as maiores resistências foram alcançadas pela composição com 15% de resíduo, no entanto, todos os tijolos fabricados apresentaram resistência inferior ao mínimo recomendado no Brasil pelas Normas pertinentes.

Silva *et al.* (2014) produziram tijolos por meio de prensagem uniaxial, utilizando composições de solo-cimento e solo-cal com incorporação de resíduo cerâmico. Após o processo de cura por períodos de 7, 28 e 56 dias os tijolos produzidos foram submetidos a ensaios de compressão simples, absorção de água e durabilidade modificada. A formulação solo + 12% cimento + 4% de resíduo cerâmico apresentou os melhores resultados. Os autores comprovaram a ocorrência de atividade

pozolânica e concluíram que a incorporação do resíduo cerâmico em misturas de solo-cimento e solo-cal é viável, uma vez que melhora as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos produzidos, atendendo às disposições das normas técnicas vigentes para uso em tijolos sem fins estruturais.

Carrasco *et al.* (2014) avaliaram a influência da adição de serragem na fabricação de tijolos de solo-cimento no que se refere ao comportamento mecânico do material. Os resultados mostraram que a influência da inserção da serragem nas características mecânicas do solo-cimento depende do tipo de solo e da forma e arranjo dos tijolos e prismas. A adição de serragem ao solo arenoso resultou em maior resistência à compressão, módulo de elasticidade e ductilidade. Aos solos argilosos, a adição gerou um decréscimo na resistência à compressão dos solos, no entanto, um incremento no módulo de elasticidade e ductilidade.

Rodrigues e Holanda (2015) incorporaram resíduo vegetal de tratamento de água em misturas de solo-cimento para fabricação de tijolos. O resíduo foi caracterizado através de ensaios de Difração de raios X, granulometria, plasticidade e teor de matéria orgânica. Constatou-se que trata-se de um material rico em minerais de quartzo e caulinita e cuja composição química apresenta teores significativos de ferro, sílica e alumina, e teor de matéria orgânica de aproximadamente, 25,85% em massa. Os tijolos foram produzidos com incorporação de até 5%, em massa, de resíduo em substituição parcial ao solo. Após a prensagem, os mesmos foram curados por 28 dias e, em seguida, determinou-se propriedades como resistência à compressão, densidade aparente e absorção de água. Os resultados obtidos demonstraram que a substituição parcial do solo pelo resíduo é viável até o percentual de 1,25% em massa.

Paschoalin Filho *et al.* (2016) incorporaram a misturas de solo-cimento, o Poli (tereftalato de etileno), comumente denominado PET, proveniente da moagem de garrafas de bebidas. Além do resíduo, os pesquisadores empregaram um solo classificado como Latossolo vermelho, poroso e de textura argilosa, e ainda, o cimento Portland II E-32. Verificou-se a resistência a compressão simples dos tijolos produzidos e identificou-se que estes valores não atingiram o mínimo recomendado pela NBR 8491 (ABNT, 2012b).

Siqueira *et al.* (2016) produziram tijolos de solo-cimento com incorporação de até de resíduos industriais como casca de ovos aviários em substituição parcial ao cimento Portland e escória de soldagem em substituição ao solo. Os tijolos foram

prensados e curados por 28 dias. Em seguida realizou-se ensaios de resistência à compressão, absorção de água, durabilidade modificada, densidade aparente, MEV e DRX. Os resultados experimentais demonstraram que a incorporação de até 30% de casca de ovos aviários e de até 15% de escória de soldagem é viável e melhoraram o empacotamento dos grãos e a densificação da microestrutura do material, bem como propriedades como absorção de água, perda de massa e resistência.

Seco *et al.* (2017) produziu tijolos a partir da mistura de solo argiloso e areia silicosa, tratados com cimento Portland, cal hidráulica e misturas de cal e escória granulada moída e outro aglomerante que consiste na combinação de óxido de magnésio e escória granulada. As amostras produzidas foram caracterizadas com base nos parâmetros de durabilidade conhecidos, após dezoito meses de exposição às condições ambientais. Os resultados demonstraram o efeito positivo da adição de areia na durabilidade desse tipo de material de construção e o bom resultado obtido com o emprego do aglutinante à base de óxido de magnésio e escória granulada.

Rashid *et al.* (2017) utilizaram resíduo cerâmico na fabricação de concretos como substituição parcial, em diferentes quantidades, ao agregado graúdo natural. Para tanto, após processo de caracterização do agregado cerâmico, moldaram-se corpos de prova cilíndricos de concreto fabricado com cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo (substituído parcialmente em 10%, 20% e 30% pelo resíduo cerâmico) e manteve-se uma relação a/c de 0,5. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade da substituição estudada para até 30%. Verificou-se um gradativo acréscimo sobre a resistência à compressão dos corpos de prova a medida que aumentou-se os teores de substituição do agregado natural pelo resíduo cerâmico. Além disso, ao analisar a microestrutura do material produzido, observou-se uma melhoria na ancoragem entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia que caracteriza a chamada zona de transição.

CAPÍTULO 3

Materiais e métodos

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados, bem como os procedimentos adotados para alcançar o objetivo da pesquisa.

A metodologia de trabalho consistiu na caracterização física e química das matérias-primas utilizadas, e na determinação dos parâmetros de resistência à compressão simples (RCS), absorção de água (AA) e de durabilidade modificada dos produtos finais. A descrição dos materiais empregados na pesquisa segue abaixo.

3.1. Matérias-primas

3.1.1. Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado na BR-101(Km 126), trecho localizado entre as cidades de São José de Mipibú e Goianinha, próximo ao rio Baldun, no estado do Rio Grande do Norte. Em estudo anterior a caracterização do solo realizada por, Silva (2013) classificou-o, segundo o padrão da Highway Research Board (HRB), como tipo A6 e pelo Unified Soil Classification System (USCS) como um solo arenoso com fração fina silto-argilosa. Ainda segundo Silva (2013) as características geotécnicas do referido solo são representativas dos solos tropicais lateríticos cuja ocorrência se dá nessa região do estado do Rio Grande do Norte.

3.1.2. Cimento

O cimento utilizado foi o CP II F-32, da marca Mizu, que apresenta propriedades recomendadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para produção de composições de solo-cimento. O produto foi adquirido no comércio local da cidade de Natal/RN.

3.1.3. Cal

Utilizou-se também a cal cálcica hidratada, CH-II (NBR 7175/2003 – Cal hidratada para argamassas - Requisitos), conforme recomendação da Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC), Programa Setorial da Qualidade da Cal Hidratada para a construção civil (2013), conhecida comercialmente como Rebocal e fabricada no município de Campina Grande/ PB.

3.1.4. Resíduo Cerâmico

O RC foi coletado em obras de pequeno e médio porte na cidade de Natal/RN e provém de tijolos cerâmicos fabricados na cerâmica Ouro Branco localizada no município de Ielmo Marinho/RN. A Figura 3.1 ilustra um ponto de coleta do referido resíduo.



Figura 3.1 - Ponto de coleta do resíduo cerâmico utilizado na pesquisa
Fonte: Silva (2013).

3.1.5. Água

Será utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento público da cidade de Natal/RN, fornecida pela concessionária local, a CAERN – Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas utilizadas foram caracterizadas, em estudo anterior, por Silva (2013) através das seguintes técnicas: Análise granulométrica, Ensaio de compactação, Limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade), Teste de retração, Ensaio de análise mineralógica por Difração de raios X (DRX) e análise química por Fluorescência de raios X (FRX). O FRX foi repetido nesta pesquisa como forma de assegurar que não houve alteração na composição química dos materiais empregados nas formulações.

3.2.1.1. Análise granulométrica

Após coletado o solo foi transportado ao laboratório de Mecânica dos solos da UFRN, onde foi seco ao ar, protegido da ação das intempéries. Após a secagem o solo foi desagregado e peneirado na peneira ABNT de nº 4 (4,8mm). Quanto ao RC, os blocos cerâmicos provenientes de quebra na execução de alvenarias de vedação, foram coletados, moídos manualmente através de almofariz e, em seguida peneirados na peneira ABNT de nº 200 (0,075mm).

Na sequência foram preparadas amostras do solo e RC para os ensaios de compactação e caracterização, NBR 6457/2016, para determinação do teor de umidade e composição granulométrica do RC e solo, segundo prescrições da NBR 7181/88. Também foi realizado ensaio de análise granulométrica por difração a laser do solo no laboratório de física experimental da UFRN através do Granulômetro - CILAS 920.

3.2.1.2. Limites de Atterberg (LL e LP)

Na determinação dos limites de Atterberg do solo, foram realizados os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Tem-se o estado plástico de solo quando o teor de umidade está entre os dois limites (LL e LP). A diferença aritmética entre os dois limites (Equação 6) determina o índice de plasticidade (IP), que configura a medida da faixa de variação da umidade dentro da qual o solo se comportará plasticamente.

$$IP = LL - LP \quad (6)$$

3.2.1.3. Massa específica do solo e do RC

A determinação da massa específica do solo e do RC foi realizada conforme a NBR 6508/84, utilizando os grãos do solo que passam na peneira N° 4 (4,8mm). O ensaio tem por objetivo determinar a massa específica das partículas do solo e do RC, relacionando a massa com o volume dos sólidos.

3.2.1.4. Teste de retração

Após as etapas de coleta, secagem e desagregação do solo, o mesmo foi submetido ao teste de retração sugerido pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do estado da Bahia (CEPED, 1984) para avaliação das características de expansão, contração e plasticidade do solo, que tem por objetivo identificar visualmente a presença de fendas transversais na parte central da amostra que ultrapassem o limite de 20 mm, valor que sugere a presença de argila expansiva, a ser confirmada ou não pelos ensaios físicos e químicos de caracterização da amostra.

3.2.2. Ensaio tecnológicos (físicos e mecânicos)

3.2.2.1. Ensaio de compactação

Segundo Silva (2013) a importância do estudo da compactação do solo é explicada pela relação entre o procedimento e o aumento da resistência mecânica, redução de sua porosidade e da absorção de água do material. A partir da realização desse ensaio é possível correlacionar as variáveis como peso específico seco máximo e umidade ótima de compactação, que serão aplicadas na moldagem dos tijolos maciços.

Após a análise granulométrica do solo e do RC, algumas amostras caracterizadas, de acordo com a NBR 6457/2016, foram utilizadas para realização do ensaio Normal de compactação do solo, conforme NBR 7182/2016, com a finalidade de determinar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo. Procedimento semelhante ao anterior foi realizado nas composições solo-aglomerante(s) e solo-aglomerante(s) mais RC, conforme prescreve a norma NBR 12023/2012.

O fluxograma ilustrado na Figura 3.2 demonstra, ordenadamente, os procedimentos executados em todo o programa experimental da pesquisa.

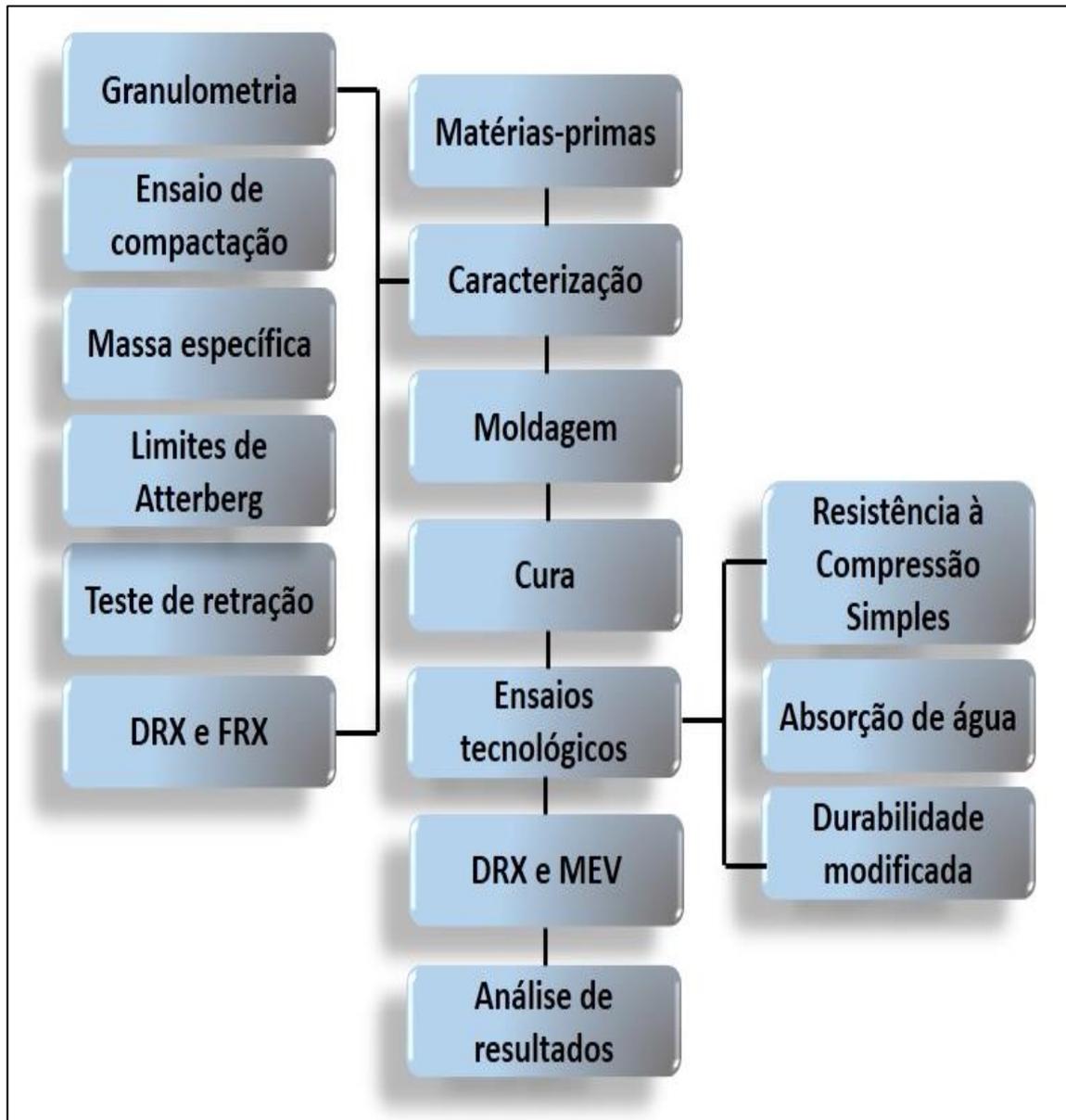


Figura 3.2 - Fluxograma representativo do programa experimental.
Fonte: Própria (2017)

3.2.3 Composições

Nas composições, o percentual de aglomerante(s) aplicado em relação à massa de solo será de 12% e o percentual de RC incorporado será de 4% em função dos resultados obtidos por Silva (2013) que indicam viabilidade econômica para produção do tijolo maciço com esta composição, em relação ao bloco cerâmico convencional, e ainda, comportamento satisfatório dos tijolos maciços para uso em alvenarias de vedação. Com base na recomendação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) que indica o teor máximo de 14% de cimento para

formulações de solo-cimento, o autor estudou composições cujos percentuais de aglomerante(s) em relação à massa de solo foram de 8%, 10% e 12% e os percentuais de RC incorporados foram de 2% e 4%, chegando à conclusão de que a mistura cujo percentual de aglomerante, nesse caso, cimento, foi de 12% e o percentual de RC incorporado foi de 4%, apresentou os melhores resultados. Neste trabalho serão produzidos e estudados, tijolos com esta composição, porém, com substituição parcial e total, o cimento pela cal e adotando como composição de referência os tijolos produzidos com solo-cimento. Vale salientar que, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a viabilidade das formulações para tijolos de solo-cimento é válida para o teor máximo de 14% de cimento Portland incorporado à mistura. A Tabela 3.1 apresenta a nomenclatura das misturas solo-aglomerante(s) e solo-aglomerante(s) com RC, que serão aplicadas na moldagem dos tijolos maciços.

Tabela 3.1 - Nomenclaturas das composições que serão produzidas na pesquisa

Nomenclatura	Composições
S12C	Solo + 12% cimento
S12CH	Solo + 12% cal
S12C4RC	Solo + 12% cimento + RC
S12CH4RC	Solo + 12% cal + RC
S6C6CH	Solo + 6% cimento + 6 %
S6C6CH4RC	Solo + 6% cimento + 6 %

3.2.3.1. Moldagem e cura dos tijolos maciços

Para cada composição proposta foram prensados 15 (quinze) tijolos maciços, sendo 9 (nove) para o ensaio de resistência à compressão simples, 3 (três) para o ensaio de absorção de água e 3 (três) para o ensaio de durabilidade modificada. Após a moldagem e prensagem, os tijolos foram levados à cura durante 90, 120 e 150 dias, envoltos por uma membrana plástica, à temperatura e umidade ambiente e abrigados, protegidos da ação do intemperismo. Essas misturas foram realizadas manualmente e os tijolos maciços foram produzidos em uma prensa manual, da marca Sahara Hobby, obtendo-se tijolos com espessura de 5,0 cm, largura de 10,0 cm e comprimento de 21,0 cm (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Prensagem de tijolo maciço utilizando prensa manual.
Fonte: Própria (2016).

3.2.3.2. Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples dos tijolos maciços serão realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, através da máquina universal AMSLER com célula de carga de 10.000Kg, aos 90, 120 e 150 dias, obedecendo-se os preceitos da NBR 8492/2012.

Os valores individuais resultantes do ensaio de RCS para os tijolos maciços, foram obtidos conforme a equação (7):

$$R_t = Q/A_t \quad (7)$$

Onde:

R_t = Resistência à compressão simples dos tijolos maciços;

Q = carga aplicada (Kgf);

$A_t = C \times L$, área dos tijolos maciços (cm^2);

3.2.3.3. Ensaio de absorção de água

Para a determinação da absorção de água dos tijolos maciços serão obedecidas as recomendações da NBR 8492/2012. Para a realização do ensaio, os tijolos serão pesados e colocados em estufa retilínea FANEM, até atingirem constância de massa. Em seguida os tijolos serão novamente pesados e colocados em imersão pelo período de 24 horas consecutivas, sendo então retirados da

imersão e pesados. Com os dados obtidos nos ciclos de pesagem, secagem e imersão em água, será calculado o percentual de absorção dos tijolos maciços prensados.

Os valores individuais de absorção de água (AA), expressa em porcentagem (%), serão obtidos pela equação (4), enquanto a absorção média será determinada pela média aritmética de três repetições.

$$AA = (M_2 - M_1) \times 100 / M_1 \quad (8)$$

Onde:

M_1 = Massa do corpo de prova seco em estufa (g);

M_2 = Massa do corpo de prova saturado (g);

AA = Absorção de água (%);

3.2.3.4. Ensaio de durabilidade modificada

O ensaio de durabilidade modificada será aplicado aos tijolos maciços adaptando-se os preceitos previstos no método de ensaio DNER-ME 203/94, que prescrevem 12 (doze) ciclos de secagem em estufa, e posterior imersão em água, sem necessidade de escovação dos tijolos. Autores como Grande (2003) e Lima *et al.*, (2006) apud Silva (2013), justificam que as solicitações de abrasão superficial a que são submetidos os tijolos nas obras de construção civil são menos rigorosas que as constatadas nas utilizadas para fins rodoviários, não sendo necessária, portanto a etapa de escovação.

Na determinação da perda de massa, aplicando os preceitos do ensaio de durabilidade modificada, depois de completados 150 dias de cura os tijolos maciços serão pesados e secos em estufa a 105 °C por 24 horas. Após a pesagem serão imersos em água por 24 horas. Em seguida serão retirados e pesados obtendo-se a massa inicial natural, a massa inicial seca e a massa úmida. Este procedimento concluiu o primeiro ciclo de 48 horas. Ao término do primeiro ciclo os tijolos maciços serão secos por 42 horas em estufa, pesados e, em seguida, mergulhados em água pelo período de 6 horas. Em seguida serão retirados e pesados completando, assim, o segundo ciclo de 48 horas. Esse procedimento experimental será repetido por 10 (dez) vezes. Ao final do ensaio terão sido realizados 12 ciclos de 48 horas, entre

secagens e molhagens. Após o último ciclo os tijolos maciços serão secos em estufa a 105°C por 24 horas e pesados, determinando-se a massa final seca.

Na determinação da perda de massa dos tijolos maciços aplicou-se a seguinte equação:

$$P_m = (M_i - M_f) \times 100 / M_f \quad (9)$$

Onde:

P_m = Porcentagem de perda de massa dos tijolos maciços;

M_i = Massa seca inicial dos tijolos maciços;

M_f = Massa seca final dos tijolos maciços

3.2.3.5. Análise química e mineralógica das matérias-primas

As matérias-primas empregadas na pesquisa foram submetidos a ensaios de caracterização de espectrometria de Fluorescência de raios X, através do aparelho Shimadzu EDX-700 para a determinação da composição química do solo, cimento, cal, RC e Difração de raios X, através do aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K α e ângulo de varredura (2θ) de 0° a 80°, para identificação das fases mineralógicas presentes nas matérias-primas (SILVA, 2013).

3.2.3.6. Análise mineralógica das composições solo-aglomerante(s) e RC

Amostras mais significativas das composições solo-aglomerante(s) e RC, oriundas dos tijolos maciços rompidos, serão submetidas a ensaios de difração de raios X, aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K α e ângulo de varredura (2θ) de 0° a 80°, para a identificação das fases mineralógicas das mesmas. As amostras selecionadas para realização desses ensaios serão previamente imersas em álcool etílico absoluto por 24 horas e secas em estufa a 110 °C, por um período de 06 horas. Posteriormente serão acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados, conforme indica o método de preparação das amostras para porosimetria por intrusão de mercúrio. Esse procedimento tem por finalidade retirar a água livre presente nas amostras das misturas de solo-aglomerante e induzir a paralisação das reações de hidratação (cimentícias e pozolânicas), evitando a continuação de alterações na microestrutura do material.

3.2.3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura

Será realizada, ainda, a caracterização morfológica do solo e das composições solo-aglomerante(s) e RC, como também da superfície de fratura das amostras dos tijolos maciços submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples através da análise de imagens obtidas pelo ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

CAPÍTULO 4

Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos durante a realização da pesquisa, desde a caracterização dos insumos que compõem as formulações estudadas até o desempenho dos tijolos produzidos a partir das mesmas.

4.1 Análise química e mineralógica das matérias-primas

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos por meio de FRX, trazendo a composição química de cada matéria-prima empregada nas formulações desenvolvidas.

Tabela 4.1 - Composição química do solo, aglomerantes e RC

ÓXIDOS	SOLO	CA(OH) ₂	CIMENTO	RC
SiO ₂	52,2	2,31	19,03	45,59
Al ₂ O ₃	36,0	0,75	4,60	35,69
Fe ₂ O ₃	1,91	0,47	3,22	7,82
MgO	0,49	6,43	3,20	4,11
CaO		88,3	60,84	1,46
K ₂ O	0,25	0,12	1,22	2,38
Na ₂ O			0,15	0,97
MnO				0,07
Mn ₂ O ₃			0,18	
Cr ₂ O ₅			0,01	
CuO	0,02			
SnO ₂		0,74		0,06
SrO		0,54	0,19	
SO ₃	0,05	0,34		0,59
P ₂ O ₅	0,02		0,16	
TiO ₂	0,68		0,27	0,94
ZnO			0,01	
ZrO ₂	0,09			0,06
V ₂ O ₅	0,04			

Com base na tabela é possível notar que o solo utilizado apresenta elevados teores de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) que, juntos, representam aproximadamente 82% da composição do referido solo. Isso indica a presença de minerais de quartzo e caulinita, o que comprovam os resultados de DRX (Figura 4.1).

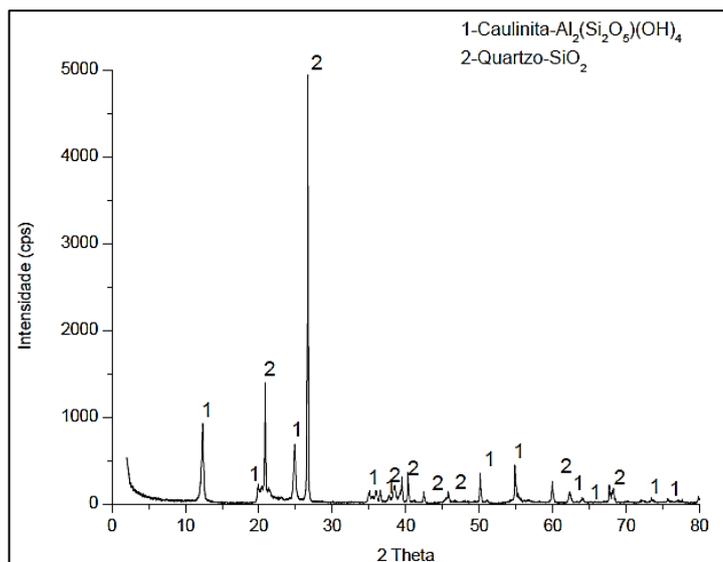


Figura 4.1 - DRX do solo

Quanto à cal utilizada, a Tabela 4.1 indica um percentual de óxido de cálcio (CaO) da ordem de 88,3% e de óxido de magnésio (MgO) da ordem de 6,43%. Com base nesses resultados e no que dispõe a NBR 7175/03, a cal utilizada classifica-se como uma cal cálcica do tipo CH-II, também confirmado pelos resultados de DRX apresentados na Figura 4.2.

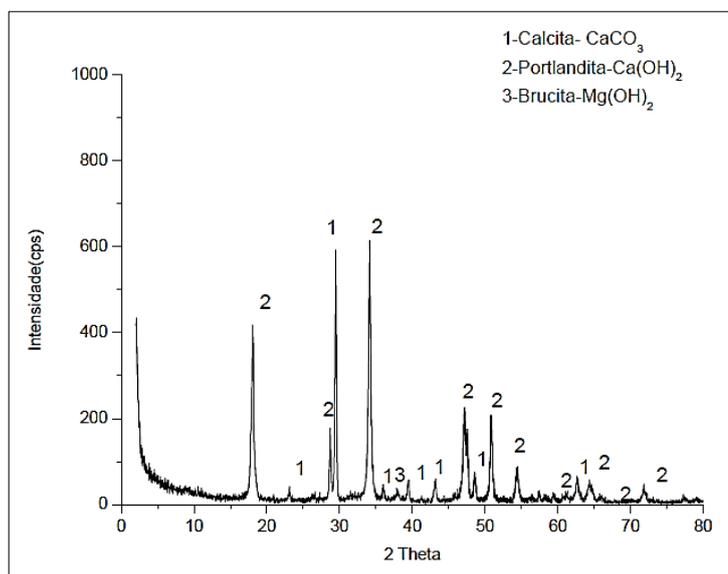


Figura 4.2 - DRX da cal

Para o cimento utilizado, a Tabela 4.1 indica um percentual de óxido de cálcio (CaO) de 60,84% o que confirma a adição de filer calcário. Através de DRX (Figura 4.3) verifica-se a presença das fases mineralógicas Calcita, Dolomita, Hatruita e

Quartzo. A identificação do silicato dicálcico (C_2S) é dificultada pela coincidência dos picos de maior intensidade com os do silicato tricálcico (hatruita).

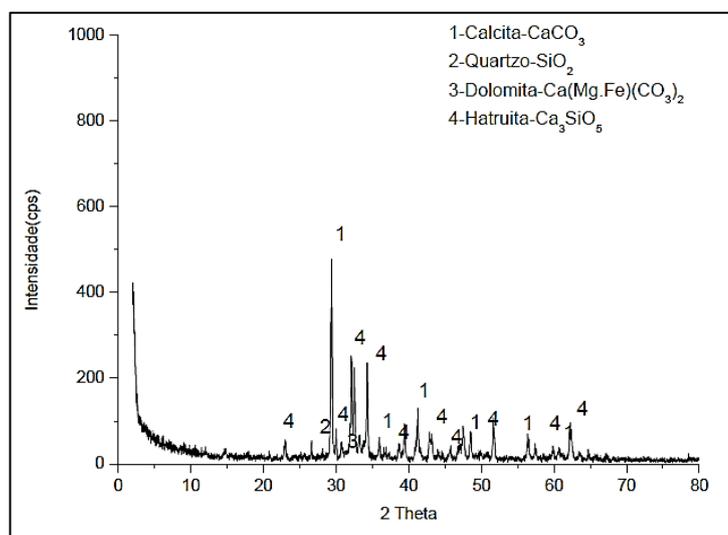


Figura 4.3 - DRX do cimento Portland

A NBR 12653/2014 estabelece os requisitos químicos e físicos para os diferentes tipos de materiais pozolânicos conhecidos, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Especificações químicas e físicas dos materiais pozolânicos conforme NBR 12653/2014 e do RC

Propriedades	Classes de materiais pozolânicos			RC
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50	89,1
SO ₃ , % máx.	4,0	5,0	5,0	0,59
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5	0,97
Exigências físicas				
Material retido na # 325,% máx	34	34	34	32,75

Verifica-se que o RC utilizado apresenta altos teores de sílica (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), cuja soma corresponde a 89,1% da composição do material, superando o mínimo exigido em Norma que equivale a 70% da composição para as pozolanas da classe N. A composição mineralógica do RC, apresentada na Figura 4.4 indica a presença das fases mineralógicas Quartzo, Phlogopita e Anortita.

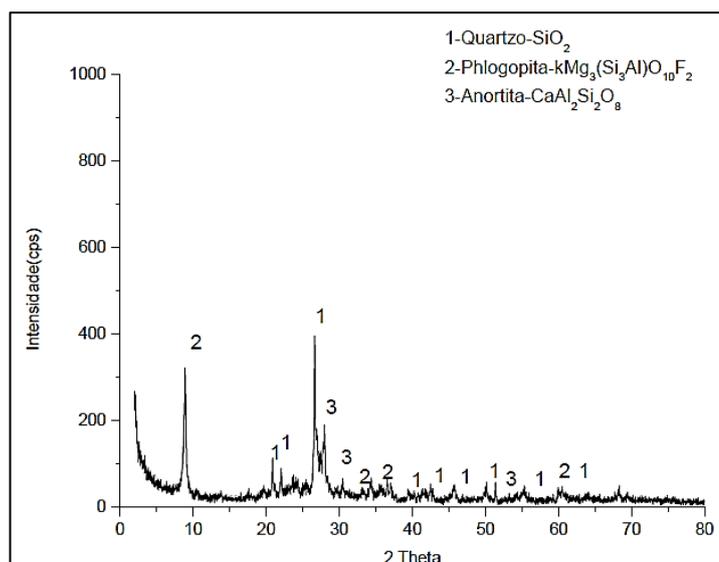


Figura 4.4 - DRX do RC

4.1 Resistência à compressão Simples

Os tijolos maciços de solo-aglomerante(s) e RC produzidos foram submetidos ao ensaio de RCS, realizado conforme a NBR 8492/2012. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.3.

Silva (2013) estudou, anteriormente, o comportamento de tijolos maciços de solo-aglomerantes e RC produzidos a partir de variadas formulações e verificou que os melhores resultados foram obtidos para aquelas cujo teor de aglomerante se aproximava de 12% e o teor de RC, de 4%. Dessa forma, é possível verificar a influência dos tipos e teores de aglomerantes, bem como do RC, sobre o comportamento dos tijolos.

Tabela 4.3 - Resistência à compressão simples (MPa)

Composições	Resistência à compressão simples (MPa)			
	90 Dias	120 Dias	150 Dias	365 dias
S12C	2,85±0,19	3,02±0,05	3,12±0,25	4,05 ± 0,08
S12C4RC	2,95±0,25	3,08±0,10	3,21±0,14	4,13 ± 0,26
S12CH	1,33±0,27	1,89±0,07	2,07±0,46	2,24 ± 0,32
S12CH4RC	1,41±0,08	1,96±0,34	2,11±0,53	2,37 ± 0,54
S6CH6C	1,45±0,15	2,01±0,01	2,18±0,04	2,56 ± 0,25
S6CH6C4RC	1,49±,32	2,05±0,26	2,32±0,08	2,65 ± 0,34

Com base nisso, à cada formulação de solo-aglomerante produzida, introduziu-se o RC a fim de verificar a influência do mesmo sobre o comportamento do tijolo. De acordo com a Tabela 4.3 e conforme o gráfico apresentado na Figura 4.5, abaixo, a formulação de Solo + 12% cimento ultrapassa o limite mínimo de RCS estabelecido pela NBR 8491/2012, desde as primeiras idades de cura, conforme era esperado.

Nota-se, ainda, um ganho de RCS de aproximadamente 25% entre as idades de 150 e 365 dias. Isso pode ser explicado pelas reações pozolânicas estabelecidas entre os argilominerais do solo e o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, cuja cinética é lenta e, portanto, requerem maior intervalo de tempo para serem desenvolvidas.

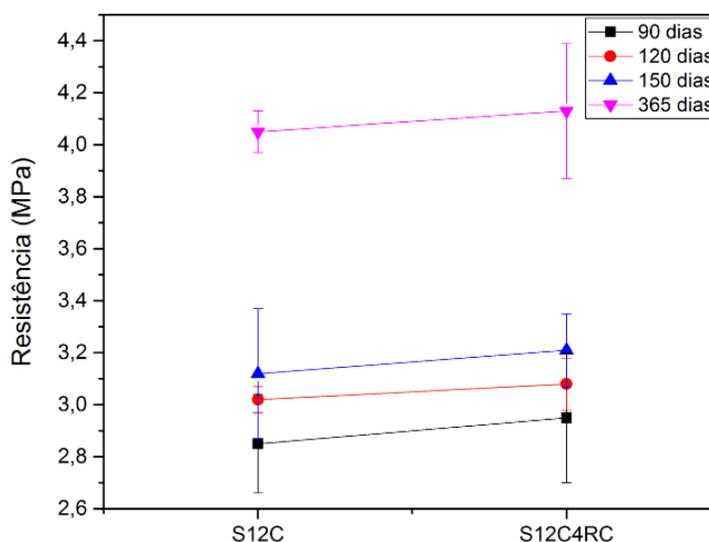


Figura 4.5 - RCS dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento + RC

Em seguida, substituindo-se o cimento pela cal, na função de aglomerante, observa-se na Tabela 4.3 e no gráfico apresentado na Figura 4.6, a seguir, que os resultados obtidos atingem o limite mínimo estabelecido pela NBR 8491/2012 apenas após os 150 dias de cura. Possivelmente, isso ocorreu devido à ausência de silicatos dicálcico (C_2S) e tricálcico (C_3S) que são abundantes no cimento e que, quando hidratados, conferem resistência mecânica mediante a produção dos silicatos de cálcio hidratados em intervalos de tempo relativamente curtos. No caso das formulações cujo aglomerante é a cal hidratada, o ganho de resistência se dá por meio das reações entre os argilominerais do solo e o hidróxido de cálcio proveniente da cal, cuja cinética de hidratação é consideravelmente lenta. Nesse

caso também observa-se que a influência do RC em relação à RCS não foi significativa.

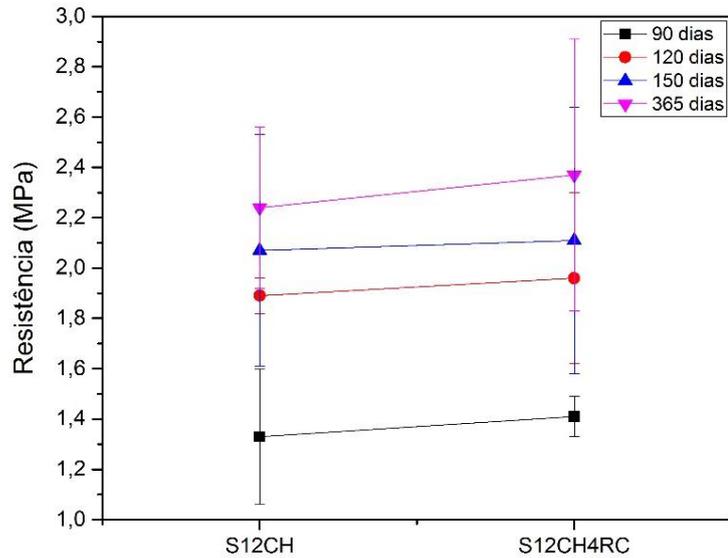


Figura 4.6 - RCS dos tijolos de solo-cal e solo-cal + RC.

Em seguida, mantendo-se o teor de aglomerante em 12%, sendo 50% deste em cimento e 50% em cal hidratada, observa-se na Tabela 4.3 e na Figura 4.7 a seguir, que após 120 dias de cura, a RCS dos tijolos já ultrapassa o mínimo exigido pela NBR 8491/2012. Isso pode ser explicado possivelmente, devido à presença de cimento e seus silicatos mencionados anteriormente, o que proporciona ganho de resistência em menores intervalos de tempo. Nota-se, ainda, que a adição do RC não resultou em acréscimo significativo para a RCS nesta formulação.

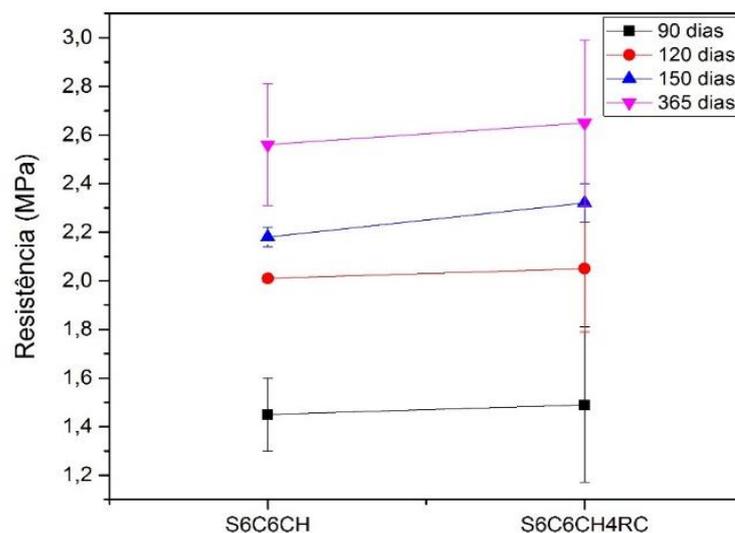


Figura 4.7 - RCS dos tijolos de solo-aglomerantes + RC.

Conforme a Tabela 4.3 e observando o gráfico da Figura 4.8 a seguir, que ilustra o comportamento dos tijolos para todas as formulações produzidas, observa-se que os melhores resultados obtidos referem-se àquelas cujo aglomerante utilizado foi cimento. Nestas a RCS obtida ultrapassa em aproximadamente 100% o valor mínimo exigido pela NBR 8491/2012, após 365 dias de idade. No entanto, entre as demais formulações produzidas, em que substituiu-se, total ou parcialmente, o cimento pela cal, observa-se que a formulação S6C6CH4RC apresentou os melhores resultados, superando o mínimo recomendado pela NBR 8491/2012 e possibilitando a redução pela metade do teor de cimento empregado nas composições.

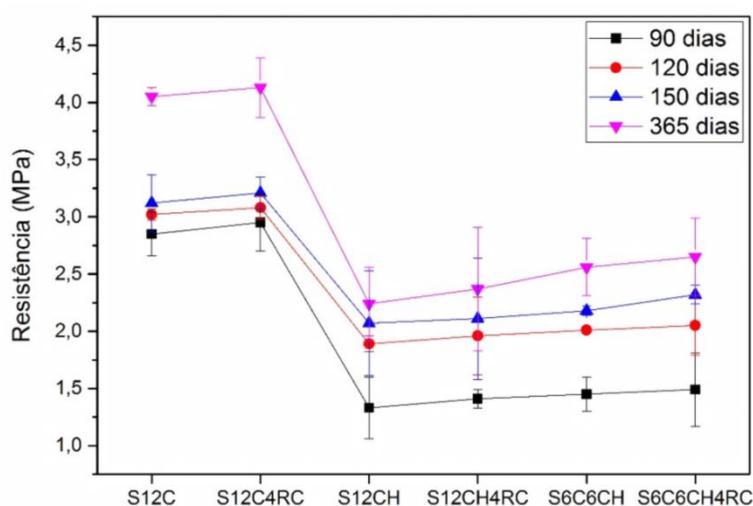


Figura 4.8 - RCS dos tijolos para todas as formulações produzidas

Em síntese, o acréscimo observado para a RCS dos tijolos, com a incorporação do RC, provavelmente resulta, por um lado, do efeito microfíler de colmatação dos poros pela fração fina que provém do resíduo e, por outro, pela produção dos silicatos hidratados, através das reações pozolânicas.

4.2 Absorção de água

Após o período de cura definido na metodologia desse trabalho os tijolos produzidos foram submetidos aos ensaios de absorção de água. Os resultados obtidos para as formulações desenvolvidas, constam na Tabela 4.4.

Composições	Absorção (%)
S12C	16,05 ± 0,26
S12CH	21,45 ± 0,32
S12C4RC	15,60 ± 0,29
S12CH4RC	18,46 ± ,027
S6C6CH	17,05 ± 0,16
S6C6CH4RC	16,12 ± 0,14

Esses resultados são representados graficamente na Figura 4.9 para facilitar a compressão dos mesmos. Vale ressaltar que todas as formulações, com exceção da S12CH, apresentaram índice de absorção inferior ao máximo recomendado pela NBR 8492/2012.

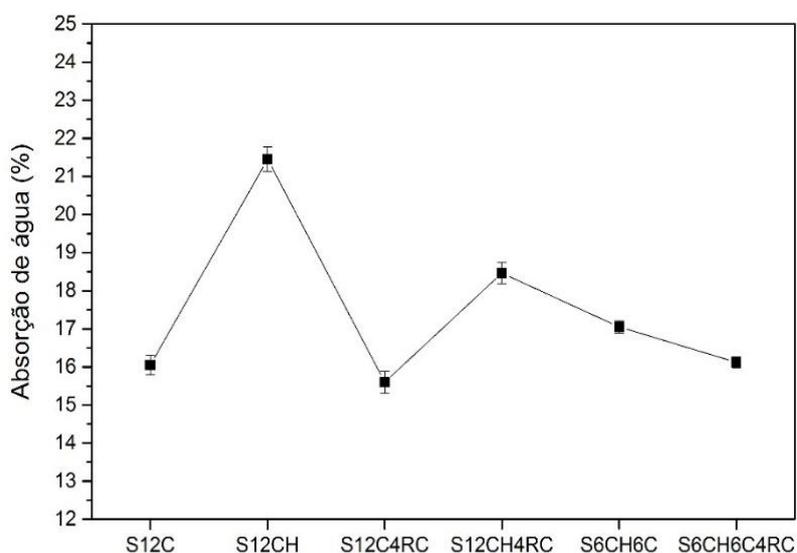


Figura 4.9 - AA dos tijolos para todas as formulações produzidas.

O gráfico ilustrado pela Figura 4.10 a seguir, compara a AA das formulações S12C e S12C4RC. Considerando o desvio padrão sobre os valores, nota-se a incorporação do RC na primeira formulação resultou em uma pequena redução do índice de AA. Isso pode ser explicado pelo fato de que as reações entre o cimento e os argilominerais do solo, por si só, ocorrem de maneira rápida e cuja produção de compostos hidratados propicia a colmatação dos poros do material, tornando-o coeso e, portanto, menos permeável à água.

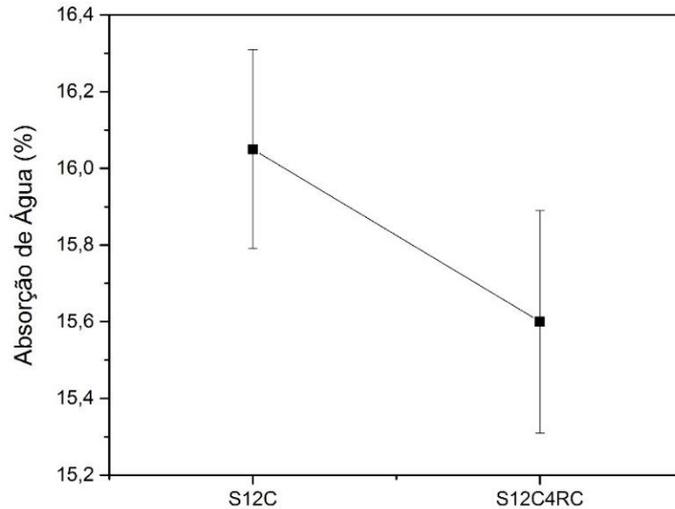


Figura 4.10 - AA dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento + RC

O gráfico da Figura 4.11 demonstra os índices de AA para as formulações S12CH e S12CH4RC, onde observa-se que a primeira não atende à recomendação da NBR 8492/2012 ultrapassando os 20% estabelecidos como limite máximo para AA. A incorporação de RC, no entanto, resultou numa redução de, aproximadamente, 14% desse índice, o que pode ser explicado por dois fatores. Primeiro, uma estabilização mecânica, também chamada efeito microfíler, onde as partículas finas do resíduo, preenchem os poros existentes, melhorando a coesão da mistura e tornando-a mais coesa e mais impermeável. Além disso, os efeitos da pozolanicidade do RC que contribui participando da formação de compostos hidratados melhorando a densificação do material.

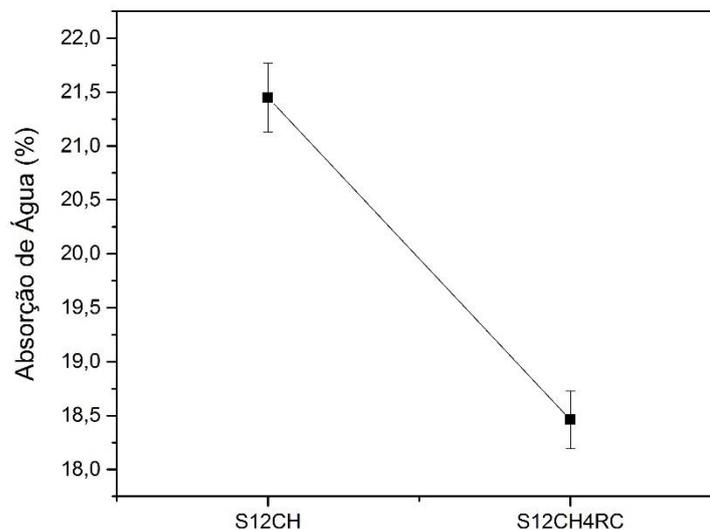


Figura 4.11 - AA dos tijolos de solo-cal e solo-cal + RC

Na Figura 4.12 observa-se os índices de AA para as formulações S6C6CH e S6C6CH4RC. Nesse caso, a redução do índice de AA com a incorporação do RC, embora tenha ocorrido, foi menor. Possivelmente, devido à presença do cimento, cuja hidratação e consequente densificação da matriz ocorre mais rapidamente, independente da ação do RC.

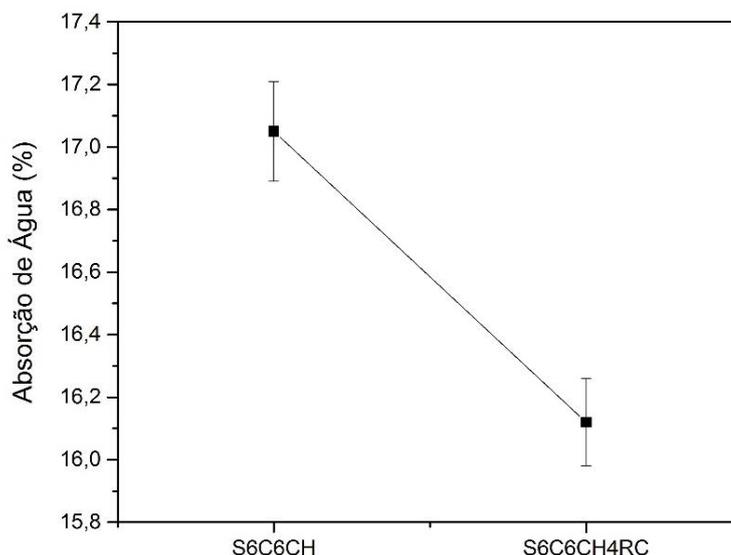


Figura 4.12 - AA dos tijolos de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal + RC.

4.3 Durabilidade modificada

A Tabela 4.5 representa os resultados de perda de massa obtidos para os tijolos produzidos. Para melhorar a visualização dos resultados, a Figura 4.13 representa-os graficamente.

Composições	Perda de massa
S12C	1,25±0,05
S12CH	3,46±0,12
S12C4RC	0,98±0,03
S12CH4RC	2,49±0,26
S6C6CH	1,67±0,42
S6C6CH4RC	1,31±0,05

Nota-se que a perda de massa para as formulações solo-cal são maiores em relação às misturas solo-cimento. Isso pode ser justificado pelo efeito da carbonatação que fragiliza a mistura solo-cal, uma vez que promove na microestrutura, a perda de cátions de cálcio que reagem com o CO₂ (dióxido de

carbono) presente no ar. Isso prejudica as reações pozolânicas entre o hidróxido de cálcio e os silicatos e aluminatos existentes no RC e no solo. Essa combinação de fatores prejudica a densificação do material, reduzindo a coesão interna entre as partículas. No entanto, é importante ressaltar que todas as formulações empregadas satisfazem à exigência da NBR 13553/2012 quanto à perda de massa que, segundo a Norma, não deve ultrapassar 7% para os solos do tipo A-6.

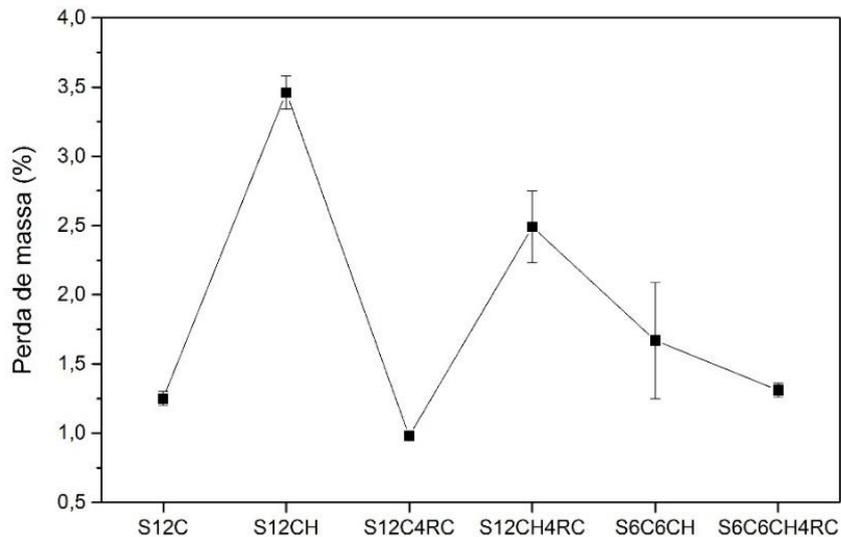


Figura 4.13 - Perda de massa dos tijolos para todas as formulações produzidas.

Na Figura 4.14 relaciona-se a perda de massa entre as formulações S12C e S12C4RC. Observa-se que a incorporação do RC resultou em uma redução de, aproximadamente, 21,6% na perda de massa em relação à formulação de S12C. Isso pode ser justificado tanto pelo efeito microfíler decorrente dos grãos finos do RC, como pela potencialização das reações pozolânicas, tendo em vista a elevada finura do RC e sua reatividade com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento.

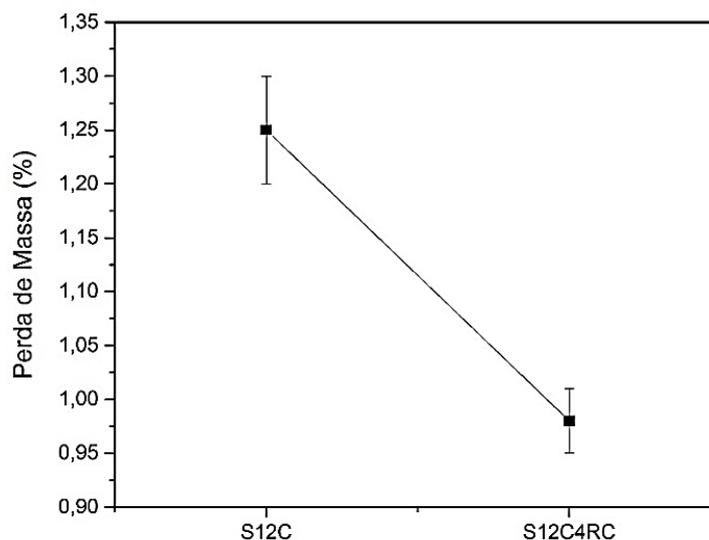


Figura 4.14 - Perda de massa dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento + RC.

A Figura 4.15 apresenta a perda de massa das formulações S12CH e S12CH4RC. A partir do gráfico, constata-se uma redução na perda de massa de, aproximadamente, 28% com a incorporação do RC. Conforme mencionado anteriormente, as ações físicas e químicas proporcionadas pelo resíduo, podem explicar essa redução. A curto prazo, tem-se o efeito microfíler, que preenche os poros melhorando a densificação da microestrutura e, a longo prazo, as reações pozolâncias entre o RC e o hidróxido de cálcio proveniente da cal. Dessa forma, a maior coesão interna e melhor densificação da microestrutura resultam na redução da porosidade do material, melhorando seu comportamento, em se tratando dos fatores relacionados à durabilidade.

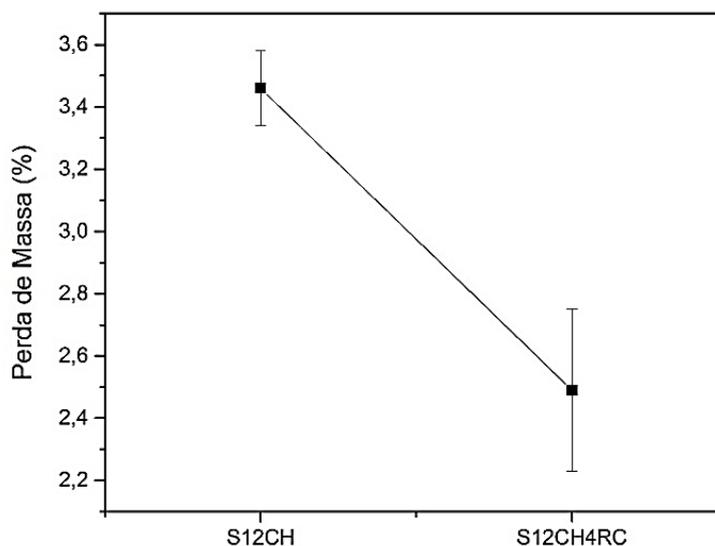


Figura 4.15 - Perda de massa dos tijolos de solo-cal e solo-cal + RC.

Por fim, a Figura 4.16 apresenta a perda de massa das misturas S6C6CH e S6C6CH4RC. Para estas formulações, dos 12% de aglomerante fixados nesta pesquisa, empregou-se 6% de cimento e 6% de cal hidratada, com intuito de manter os compostos (silicatos e aluminatos) resultantes da hidratação cimentícia e elevar o percentual da fase portlandita que poderá reagir com os altos teores de sílica e alumina presentes no solo e no RC, caracterizando a reação pozolânica na formulação, e simultaneamente promover a substituição, ainda que parcial, do cimento pela cal aproveitando as ações positivas da incorporação do RC à mistura. Analisando-se as duas formulações observa-se que a perda de massa foi reduzida com a ação do resíduo, a exemplo do que aconteceu nas demais. Como nos casos anteriores, o efeito causado pelo resíduo na perda de massa pode ser explicado, tanto pelo efeito microfíler, como pelo desenvolvimento das reações pozolânicas que ocorrem entre os argilominerais do solo e o RC com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento e da cal.

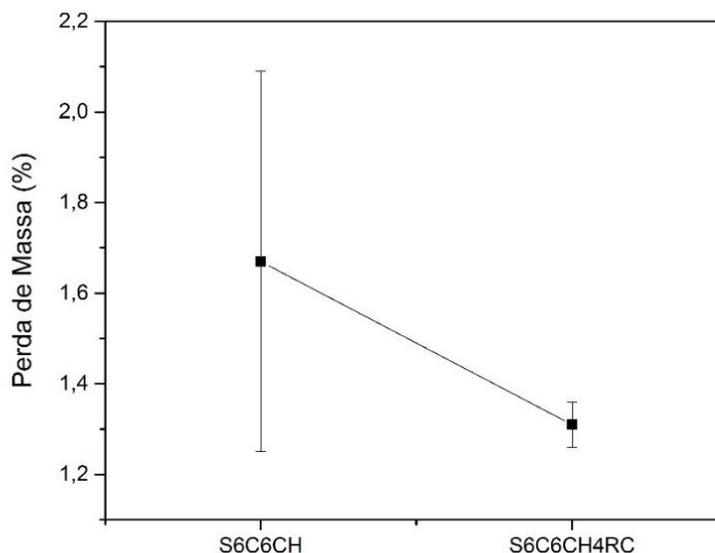


Figura 4.16 - Perda de massa dos tijolos de solo-cimento-cal e solo-cimento-cal + RC.

Após obtenção dos resultados analisados, as formulações estudadas nesta pesquisa foram submetidas a ensaios de Difração de raios-X e Microscopia Eletrônica de varredura, a fim de viabilizar a correlação e compreensão da influência da microestrutura dos materiais sobre seu comportamento tecnológico.

4.4 Análise mineralógica das composições solo-aglomerante(s) e RC

As composições desenvolvidas na pesquisa foram submetidas à difração de raios X, após serem rompidas em ensaio de RCS aos 365 dias de idade. A seguir, na Figura 4.17 para a formulação S12C, o DRX demonstra a presença das fases mineralógicas quartzo, calcita e caulinita. Destaca-se a predominância do quartzo e do argilomineral caulinita resultantes da fração fina do solo empregado. A ocorrência da fase calcita pode ser justificada pela presença do cimento como componente da formulação, o que já era esperado devido ao alto teor de óxido de cálcio comprovado mediante FRX.

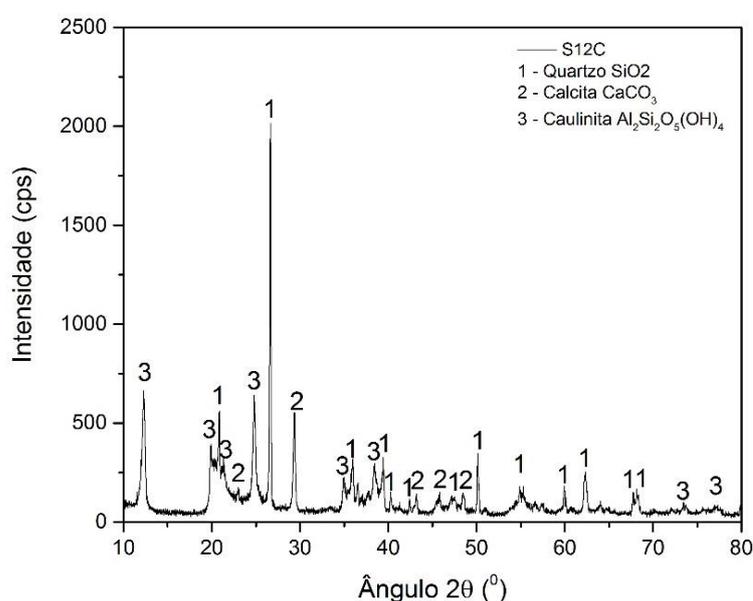


Figura 4.17 - DRX da formulação S12C

A Figura 4.18 traz a composição mineralógica da formulação S12C4RC, em que observa-se, basicamente, picos de quartzo, o que comprova os altos teores de sílica na composição do solo e do RC empregados na formulação, e picos de calcita que eram esperados devido à utilização de um cimento com adição de fíler calcário.

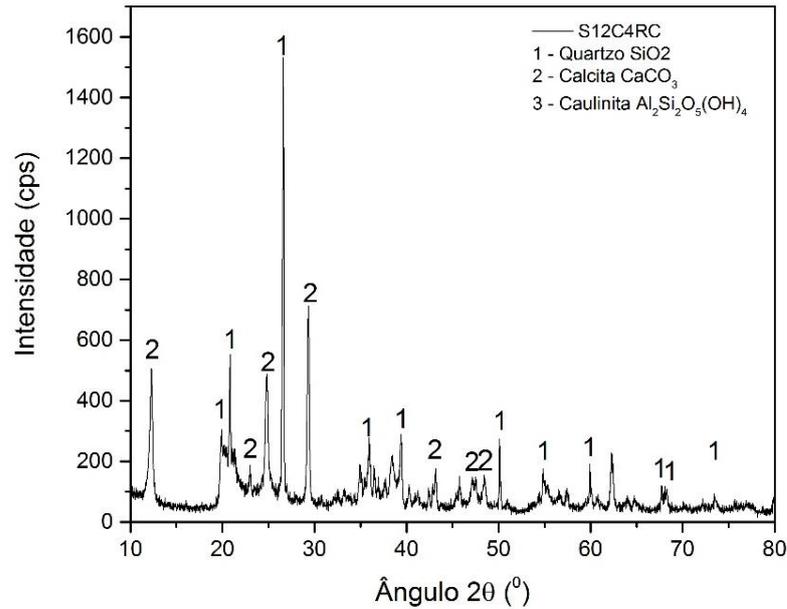


Figura 4.18 - DRX da formulação S12C4RC

Para a formulação S6C6CHRC, na Figura 4.19 também constata-se a ocorrência das fases quartzo, calcita e caulinita. Se comparado as da formulação S12C discutida anteriormente, nota-se que para S6C6CHRC, os picos do argilo-mineral caulinita são bastante expressivos. Isso pode ser justificado pela predominância do solo na composição, visto que o mesmo traz componentes de natureza argilosa. Nesse caso permanece predominando a ocorrência do quartzo e da caulinita. A presença da calcita é atribuída ao emprego do cimento e da cal hidratada na composição.

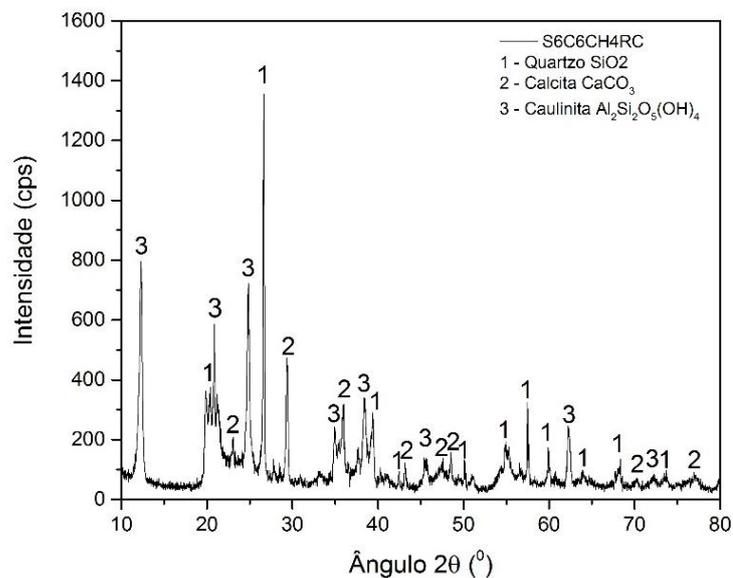


Figura 4.19 - DRX da formulação S6C6CHRC

A Figura 4.20 traz os resultados de DRX para a composição S12CH4RC. O mineral quartzo aparece com grande intensidade, justificado pelo alto teor de SiO₂ constatado no solo e, ainda pela predominância deste constituinte nas formulações estudadas.

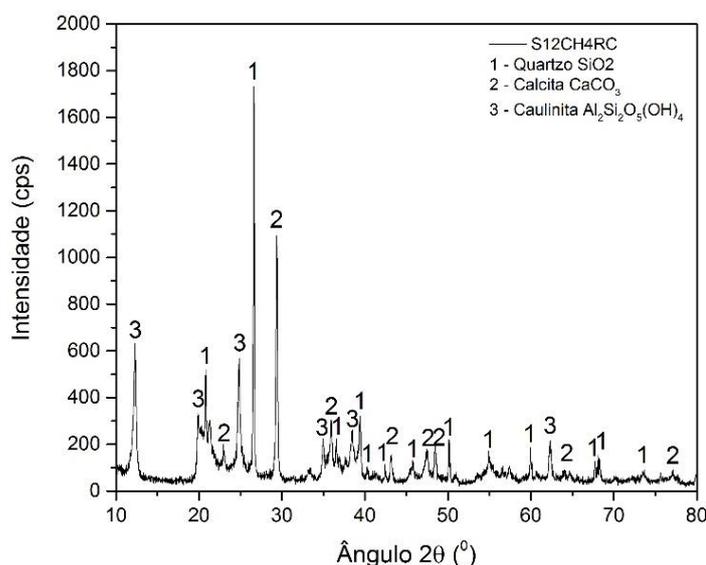


Figura 4.20 - DRX da formulação S12CH4RC

4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

As formulações desenvolvidas na pesquisa, cujo rompimento ocorreu aos 365 dias de idade, foram encaminhadas para realização de Microscopia eletrônica de varredura a fim de analisar as respectivas superfícies de fratura. A seguir apresenta-se os resultados obtidos por meio do ensaio, bem como as discussões pertinentes, para as formulações cujos tijolos apresentaram melhor desempenho nos ensaios tecnológicos, assim como procedeu-se com o ensaio de DRX discutido acima.

A Figura 4.21 apresenta a micrografia para a formulação S12C. Na mesma, observa-se a presença dos cristais prismáticos hexagonais que caracterizam a Portlandita ou hidróxido de cálcio, além das ramificações fibrosas características do silicato de cálcio que aparecem em quantidade significativa e distribuída por toda a área avaliada. Constata-se, ainda, uma boa densificação da matriz através dos minerais e compostos formados, justificando os resultados obtidos por meio dos ensaios tecnológicos. Trata-se da formulação cujos resultados dos ensaios de RCS, AA e perda de massa foram os melhores e, nesta pesquisa, serviu como referência

para viabilizar as análises posteriores acerca da influência da cal hidratada e do resíduo cerâmico.

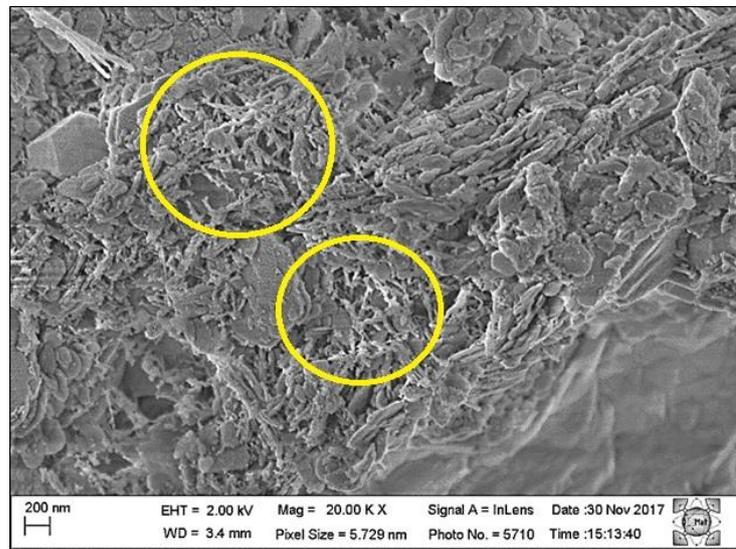


Figura 4.21 - Micrografia da formulação S12C – Ampliação de 20Kx.

A Figura 4.22 exibe a micrografia referente à formulação S6C6CH4RC. Assim como na composição anterior, é possível observar a ocorrência dos cristais prismáticos hexagonais de portlandita e as estruturas fibrosas do silicato de cálcio hidratado. Possivelmente, isso contribuiu para o ganho de resistência mecânica e para os índices de AA e perda de massa apresentados anteriormente.

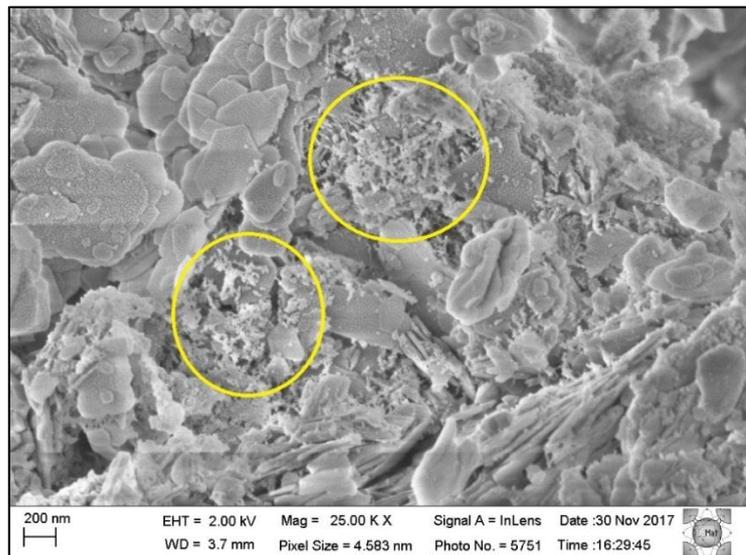


Figura 4.22 - Micrografia da formulação S6C6CH4RC – Ampliação de 25Kx

Na figura 4.23 observa-se a micrografia da composição S12CH4RC, em que o cimento é completamente substituído pela cal hidratada na função de aglomerante,

além da incorporação de 4% de RC. Na Figura 4.23 (a) é possível observar a expressiva ocorrência do silicato de cálcio hidratado, distribuído por toda a área de varredura e, ainda, uma boa densificação da matriz (Figura 4.23 (b)), possivelmente, devido aos resultados do chamado efeito microfíler.

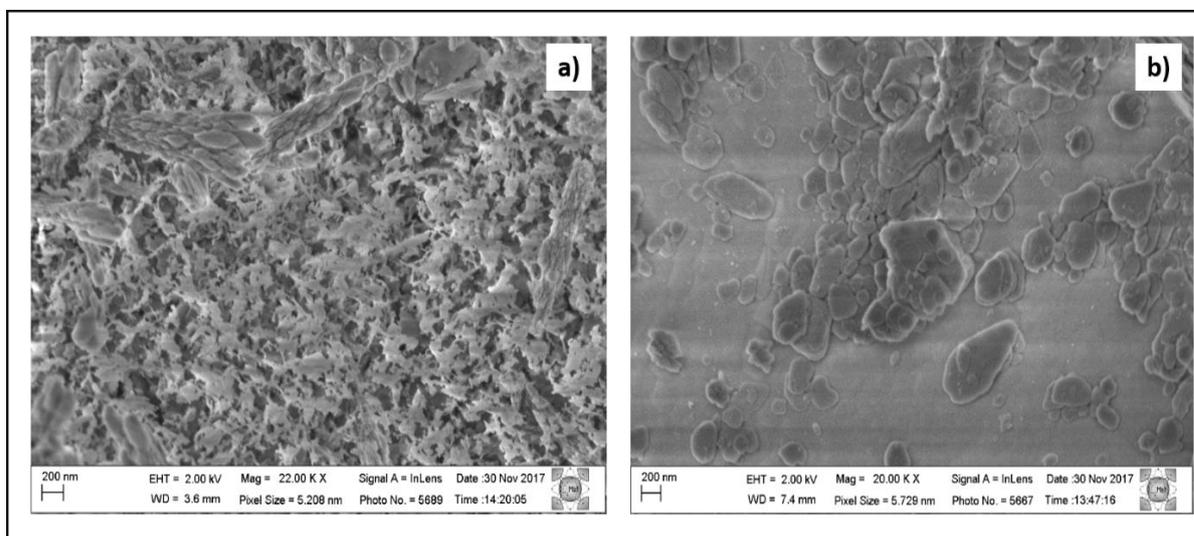


Figura 4.23 - Micrografia da formulação S12CH4RC (a) Ampliação de 22Kx (b) Ampliação de 20Kx.

A formação de silicatos de cálcio hidratado e a densificação da microestrutura resultou na baixa ocorrência de poros, o que originou um material mais coeso e, portanto, mais denso, justificando o bom desempenho da formulação nos ensaios tecnológicos.

4.6 Estudo comparativo do preço unitário para produção do tijolo maciço de solo- aglomerante(s) e RC em relação ao tijolo cerâmico convencional.

Para os cálculos de custo unitário abaixo, adotou-se o preço de R\$ 20,00 para o saco de 50kg de cimento Portland e R\$ 10,00 para o saco de 20 kg da cal hidratada. Os encargos sociais, bem como o custo de mão-de-obra, foram considerados com base na tabela de encargos do SINDUSCON/RN 2017-2018.

Para produção de 20 tijolos com as dimensões 5,0 X 10,0 X 21,0 cm para a composição S12C4RC utilizou-se os seguintes materiais e insumos:

- Solo – 32,0 kg;
- Cimento – 12% em relação à massa do solo = 3,84 Kg;

- Resíduo Cerâmico – 4% em relação à massa do solo = 1,28 Kg;
- Mão de obra – R\$ 5,91/hora (dado obtido no SINDUSCON/RN para a profissão de pedreiro);
- Estimativa de produção da prensa manual Sahara HOBBY – 100 unidades/hora;
- Encargos sociais – 142,7%;
- IPI – 5% do custo unitário;

Cálculo do custo unitário do tijolo maciço na composição S12C4RC, tendo como base o preço médio do comércio local:

- Cimento – R\$ 0,40/Kg;
- Cimento = $(3,84 \times 0,40)/20 = R\$ 0,0768$
- Soma do custo unitário dos materiais:
- R\$ = R\$ 0,0768
- Mão de obra: $(R\$ 5,91/h)/100 \text{ unidade/hora} = R\$ 0,0591$
- Custo unitário da mão de obra + encargos sociais:
- $R\$ 0,0591 \times 2,427 = R\$ 0,1434$
- Custo unitário dos materiais + mão de obra = R\$ 0,2202
- Custo unitário do tijolo maciço + IPI = $0,2202 \times 1,05 = R\$ 0,23$

Para produção de 20 tijolos com as dimensões 5,0 X 10,0 X 21,0 cm para a composição S12CH4RC, utilizou-se os seguintes materiais e insumos:

- Solo – 32,0 kg;
- Cal hidratada – 12% em relação à massa do solo = 3,84 Kg;
- Resíduo Cerâmico – 4% em relação à massa do solo = 1,28 Kg;
- Mão de obra – R\$ 5,91/hora (dado obtido no SINDUSCON/RN para a profissão de pedreiro);
- Estimativa de produção da prensa manual Sahara HOBBY – 100 unidades/hora;
- Encargos sociais – 142,7%;
- IPI – 5% do custo unitário;

Cálculo do custo unitário do tijolo maciço na composição S12CH4RC, tendo como base o preço médio do comércio local:

- Cal hidratada – R\$ 0,5/Kg;
- Cal hidratada = $(3,84 \times 0,5)/20 = \text{R\$ } 0,096$
- Soma do custo unitário dos materiais:
- R\$ = R\$ 0,096
- Mão de obra: $(\text{R\$ } 5,91/\text{h})/100 \text{ unidade/hora} = \text{R\$ } 0,0591$
- Custo unitário da mão de obra + encargos sociais:
- $\text{R\$ } 0,0591 \times 2,427 = \text{R\$ } 0,1434$
- Custo unitário dos materiais + mão de obra = R\$ 0,2394
- Custo unitário do tijolo maciço + IPI = $0,2394 \times 1,05 = \text{R\$ } 0,25$

Para produção de 20 tijolos com as dimensões 5,0 X 10,0 X 21,0cm para a composição S6C6CH4RC utilizou-se os seguintes materiais e insumos:

- Solo – 32,0 kg;
- Cimento – 6% em relação à massa do solo = 1,92 Kg;
- Cal hidratada - 6% em relação à massa do solo = 1,92 Kg;
- Resíduo Cerâmico – 4% em relação à massa do solo = 1,28 Kg;
- Mão de obra – R\$ 5,91/hora (dado obtido no SINDUSCON/RN para a profissão de pedreiro);
- Estimativa de produção da prensa manual Sahara HOBBY – 100 unidades/hora;
- Encargos sociais – 142,7%;
- IPI – 5% do custo unitário;

Cálculo do custo unitário do tijolo maciço na composição S6C6CH4RC, tendo como base o preço médio do comércio local:

- Cimento – R\$ 0,40/Kg;
- Cimento = $(1,92 \times 0,40)/20 = \text{R\$ } 0,0384$;
- Cal hidratada – R\$ 0,5/kg
- Cal hidratada = $(1,92 \times 0,5)/20 = \text{R\$ } 0,048$

- Soma do custo unitário dos materiais:
- R\$ = R\$ 0,0864
- Mão de obra: (R\$ 5,91/h)/100 unidade/hora = R\$ 0,0591
- Custo unitário da mão de obra + encargos sociais:
- R\$ 0,0591 x 2,427 = R\$ 0,1434
- Custo unitário dos materiais + mão de obra = R\$ 0,2298
- Custo unitário do tijolo maciço + IPI = 0,2298 x 1,05 = R\$ 0,24

Considerando-se que o preço unitário médio do tijolo cerâmico maciço convencional disponível no comércio local é de R\$ 0,20, constata-se que este encontra-se mais barato, em comparação aos tijolos produzidos nesta pesquisa. No entanto, foi possível perceber que a fabricação de tijolo cerâmico maciço no estado do Rio Grande do Norte é bastante reduzida e, portanto, há certa dificuldade para encontrá-lo no mercado. Por outro lado, o bloco cerâmico vazado para aplicação em alvenarias de vedação é amplamente produzido e seu uso é fortemente disseminado na construção civil em todo o Estado. A unidade do bloco vazado é comercializada ao preço médio de R\$ 0,50, significativamente mais caro que os tijolos maciços também destinados a alvenaria de vedação, produzidos nesta pesquisa.

Além da questão financeira, propriamente dita, é de grande relevância enfatizar os benefícios da utilização dos tijolos maciços de solo-aglomerantes-RC propostos nesse trabalho, do ponto de vista ambiental. Nesse caso, além de promover a destinação de um resíduo que seria descartado no meio ambiente, causando impactos diversos ao mesmo, viabiliza-se ainda, a substituição do cimento Portland, um material demasiadamente degradante, como discutido anteriormente. Por fim, a produção do tijolo maciço objeto dessa pesquisa, dispensa a etapa de sinterização, que além de ser responsável por aproximadamente 40% dos custos de produção desse tipo de componente construtivo e que, consiste numa etapa produtiva que gera poluição e demais impactos provenientes desta.

De posse dessas informações e de toda a discussão dos pontos de vista técnico e ambiental desenvolvidas neste trabalho, conclui-se enfatizando a importância da conscientização e disseminação das práticas de desenvolvimento sustentável, a fim de que promova-se o crescimento ordenado e sistematizado das cidades brasileiras, garantindo a manutenção dos recursos naturais e um meio ambiente salubre para as gerações atuais e futuras. Além disso, os resultados

obtidos nesta pesquisa também demonstram melhorias nas propriedades dos tijolos produzidos a partir da incorporação do resíduo, o que demonstra benefícios, não só do ponto vista ambiental, mas técnico, no que se refere à utilização do RC nas formulações.

CAPÍTULO 5

Considerações finais

5.1 Conclusões

Com base nos resultados experimentais obtidos nessa pesquisa e as respectivas discussões apresentadas acima, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- A incorporação do resíduo cerâmico resultou melhoria em todas as formulações produzidas. Isso foi constatado, tanto nos ensaios físico mecânicos, como nos de DRX e MEV, que avaliaram a composição mineralógica dos tijolos e as condições da microestrutura da superfície de fratura;
- Entre as formulações ternárias, S12CH4RC apresentou desempenho positivo e em conformidade com as Normas pertinentes, nos ensaios de RCS, AA e durabilidade modificada. Esses resultados podem sugerir a viabilidade técnica da substituição total do cimento pela cal, com a contribuição do RC incorporado, desde que observado o período de cura necessário para a efetiva hidratação da cal e a conclusão das reações pozolânicas;
- A formulação quaternária S6C6CH4RC apresentou os melhores resultados para os ensaios físico-mecânicos. Observou-se, ainda, que a mesma apresentou uma microestrutura melhor densificada, menos porosa e mais homogênea. Isso justifica, inclusive o bom comportamento constatado nos ensaios anteriores;
- As análises da microestrutura dos tijolos produzidos, através de DRX, confirmam a formação de quartzo, calcita e caulinita (minerais esperados, com base na composição química dos constituintes das formulações, obtidos através do ensaio de FRX anterior). As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura confirmam a formação do silicato de cálcio de cálcio hidratado e a baixa porosidade das superfícies de fratura dos tijolos

produzidos. Isso explica os bons resultados obtidos nos ensaios tecnológicos anteriores.

- A análise do custo/benefício sobre os tijolos produzidos, mostrou-se positiva, uma vez que, embora os tijolos de solo-aglomerante(s), apresentem valores pouco maiores que os tijolos convencionais, trazem importantes benefícios do ponto de vista ambiental, em detrimento aos tijolos/blocos convencionais comercializados no mercado. Além disso, do ponto de vista técnico, os tijolos produzidos com incorporação de RC também apresentaram melhoria no desempenho.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista o vasto campo de pesquisa que envolve essa temática, e a crescente necessidade de soluções técnica, econômica e ambientalmente corretas na construção civil, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Desenvolver formulações com teores de solo cada vez menores, uma vez que trata-se de um recurso natural, cuja extração também pode causar danos ambientais e ter consequências negativas a médio e longo prazo;
- Incorporar às formulações, outro tipo de resíduo, junto ao RC, que também apresente atividade pozolânica a fim de potencializar a formação de silicatos e aluminatos, viabilizando a utilização de teores cada vez mais reduzidos de aglomerantes e/ou solo.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6457**: Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

_____. **NBR 6508**: Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 1984.

_____. **NBR 7182**: Solo – ensaio normal de compactação. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1988.

_____. **NBR 8492**: Solo – Cimento – tijolos maciços de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. **NBR 12023**: Solo-cimento – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. São Paulo, 2015.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M.; CHAVES, A. P.; ALMEIDA, S. L. M.; LIMA, F. M. R. S.; GOMES, P. C. Aperfeiçoamento da reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição: Uso em concretos. **In**: Seminário: O uso da fração fina da britagem (II SUFFIB), São Paulo, Brasil, 2005, pp. 1–6.

ASTM, C. 150, Standard specification for Portland cement. Annual book of ASTM standards, v. 4, 2002.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 488 p.

BRASIL. Lei nº 12.305, 02 de agosto de 2010. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010^a.

BERNUCCI, L.B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. Tese

de doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. São Paulo - SP. 237p, 1995.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2006. 509 p.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, volume1. Editora LTC. 6ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; BRUM, I. A. S.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P.; COSTA, D. B. **Características do entulho e do agregado reciclado**. Capítulo 5. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

CARRASCO, E. V. M.; SILVA, S. R.; MANTILLA, J. N. R. Assessment of Mechanical Properties and the Influence of the Addition of Sawdust in Soil–Cement Bricks Using the Technique of Ultrasonic Anisotropic Inspection. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 2, p. 219-225, 2012.

CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. **Diário Oficial da União. Brasília**, DF, 17 de jul. 2002. p. 95-96.

CORINALDESI, V. Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 778-784, 2012.

EL-ATTAR, Mohamed M.; SADEK, Dina M.; SALAH, Amir M. Recycling of high volumes of cement kiln dust in bricks industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 506-515, 2017.

FELEKOĞLU, Burak; TÜRKEL, Selçuk; BARADAN, Bülent. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and Environment**, v. 42, n. 4, p. 1795-1802, 2007.

FERREIRA, Regis de Castro; GOBO, Júlio C. da C.; CUNHA, Ananda HN. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2008.

FIGUEIREDO, Suélen Silva; SILVA, Cibelle Guimarães; NEVES, Gelmires A. Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 3, 2011.

FIGUEIREDO, S. S.; SILVA, C. G.; BEZERRA, I. M. T.; DIAS, S. L.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L. (2012): Soil-lime blocks using construction residues – durability study. **Materials Science Forum**, Vols. 727-728, p. 1422-1427.

GARCIA, E. *et al.*, Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 251-258, 2015.

GÓIS, Luciano Costa de. **Estudo da incorporação da cal em composições binárias de solo-cimento para produção de tijolos maciços**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

GUIMARÃES, J. E. P., **A Cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil**, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, Editora Pini, São Paulo, 2002.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. Capítulo 1. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p

John, V. M.; Agopyan, V. **Reciclagem de resíduos da construção. Seminário – Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares**. Secretaria de estado do Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

LIMA, R. C. O., **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduos de granito**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, PB, 2010.

LOVATO, P.S. **Verificação dos parâmetros de controle dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

LUCAS, E. A.; MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S. (2016): Clay-based construction and demolition waste as a pozzolanic addition in blended cements. Effect on sulfate resistance. **Construction and Building Materials**, p. 950–958.

MARKU, J. *et al.*, The characterization and the utilization of cement kiln dust (CKD) as partial replacement of Portland cement in mortar and concrete production. **Zaštita materijala**, v. 53, n. 4, p. 334-344, 2012.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 669 p.

MIRANDA, L. de A. *et al.*, Evaluation of grits as the building materials in the production of soil-cement bricks. **Revista Árvore**, v. 35, n. 6, p. 1335-1340, 2011.

MME. **Análise-síntese da transformação mineral no Brasil**. Brasília: SGM, 2009.

NAGALLI, A. (2014): **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. 1ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, p. 167.

NÓBREGA A.R.S. **Contribuição ao diagnóstico da geração de resíduo de construção civil em Campina Grande**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2002.

OJURI, O. O.; ADAVI, A. A., and OLUWATUY, O. E. i. "Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction." **Transportation Geotechnics** 10 (2017): 1-12.

OLIVEIRA, M. E. D.; MORAES SALES, R. J.; OLIVEIRA, L. A. S.; CABRAL, A. E. B. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 3, p. 219-224, 2011.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulhos da construção civil**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2004. 218p.

OLIVEIRA, J. de; AMARAL, A. G. do; SCHNEIDER, R. M. Incorporação de resíduos sólidos na fabricação de tijolos solo-cimento. **Nativa**, v. 2, n. 1, p. 53-57, 2014.

ORTIGÃO, J. A. R.; **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 391 p.

OTI, J. E.; KINUTHIA, J. M., and BAI, J. "Design thermal values for unfired clay bricks." **Materials & Design** 31.1 (2010): 104-112.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; STOROPOLI, J. H.; DIAS, A. J. G. Evaluation of compressive strength and water absorption of soil-cement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 38, n. 2, p. 163, 2016.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354 p.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p

RAPV – Reunião anual de pavimentação, 44. 2015, Foz do Iguaçu. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. Foz do Iguaçu: Rapv, 2015. 12 p.

RASHID, K. *et al.* Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 829-840, 2017.

APA

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of water treatment plant waste for production of soil-cement bricks. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 197-202, 2015.

Schneider, D. M. (2003) **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. Dissertação (mestrado em Saúde Pública) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 131 p.

SECO, A. *et al.*, Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 600-605, 2017.

SEGANTINI, da S. A. A.; WADA, P. H. An evaluation of the composition of soil cement bricks with construction and demolition waste. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 33, n. 2, p. 179-184, 2011.

SILVA FILHO, A. F. **Gestão dos resíduos sólidos das construções prediais na cidade de Natal-RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção: Natal/RN, 2005. 118p.

Silva, M. B. L., **Novos materiais à base de resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de produção de cal (RPC) para uso na construção civil**. Dissertação (mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 73 p, 2014.

SILVA, V. M. da *et al.*, Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks. **Materials Research**, v. 17, n. 2, p. 326-331, 2014.

SILVA, V. M. da. **Estudo da potencialidade do resíduo cerâmico incorporado na produção de tijolos maciços de solo-aglomerante(s)**. 2013. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SIQUEIRA, F. B. et al. Influence of industrial solid waste addition on properties of soil-cement bricks. **Cerâmica**, v. 62, n. 363, p. 237-241, 2016.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks. **Journal of environmental management**, v. 131, p. 1-6, 2013.

TAN, Y.; MOZHEN, H. and DIANQING, L. "Effects of agglomerate size on California bearing ratio of lime treated lateritic soils." International **Journal of Sustainable Built Environment** 5.1 (2016): 168-175.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons de cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de**

resíduos de construção e demolição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. dal. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p.47-63, dez. 2004.

VILLIBOR, Douglas Fadul et al. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas.** 2. ed. São Paulo: Arte e Ciência, 2009. 193 p.

WANG, Y. *et al.*, "Aggregate size effect on the development of cementitious compounds in a lime-treated soil during curing." **Applied Clay Science** 136 (2017): 58-66.