



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DA CAL EM COMPOSIÇÕES BINÁRIAS
DE SOLO-CIMENTO PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS

Luciano Costa de Góis

Orientador: Dr. Wilson Acchar

Dissertação n.º /PPGCEM

Dezembro de 2012

Natal – RN

Luciano Costa de Góis

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DA CAL EM COMPOSIÇÕES BINÁRIAS
DE SOLO-CIMENTO PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Centro de Ciências Exatas e da Terra, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Wilson Acchar

Natal

2012

Ao meu pai, in memoriam,
A minha família, especialmente mãe, esposa e filhos,
Pela compreensão e apoio para a conclusão desse trabalho científico.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Wilson Acchar, pela maturidade com que conduziu o desenvolver deste trabalho acadêmico;

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais;

Ao Professor Vamberto Monteiro da Silva por participar das etapas deste trabalho;

Aos professores e técnicos do Laboratório de solos da UFRN;

Aos bolsistas do LAPFIMC pelo companheirismo e colaboração;

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte pelo incentivo à qualificação;

A minha família, especialmente, esposa e filhos, por acreditarem e incentivarem em todas as etapas de realização desse trabalho acadêmico;

A todos os amigos que de alguma forma colaboraram para a elaboração deste trabalho;

Ao Deus presente em nossas vidas;

A ciência não é uma ilusão,
Mas seria uma ilusão acreditar,
Podemos encontrar noutra lugar,
O que ela não nos pode dar.

Sigmund Freud

RESUMO

O uso de aglomerantes no solo para a produção de tijolos maciços é uma técnica construtiva antiga que tem sido utilizada por diversas civilizações ao longo do tempo. Ao mesmo tempo, a necessidade de preservação ambiental e a tendência de escassez dos recursos naturais fazem com que a construção civil invista na pesquisa de novos conceitos, métodos e materiais para os sistemas construtivos visando à sustentabilidade econômica de suas atividades. Sendo assim, surge a necessidade de se obter materiais de construção com baixo consumo de energia, com capacidade de reduzir o crescente déficit habitacional da população rural e urbana. Atualmente, pesquisas têm sido realizadas sobre esse tema, visando compreender melhor as reações cimentícias e pozolânicas que ocorrem na formação da microestrutura do sistema solo-cimento quando adicionados outros materiais, como, por exemplo, a cal, e a relação existente entre a microestrutura formada e suas interfaces, com as propriedades físicas, mecânicas e químicas verificadas nos compostos produzidos a partir dessas composições ternárias. Nesse contexto, esse trabalho teve por objetivo analisar os resultados da influência da incorporação da cal ao solo-cimento para compor uma mistura ternária para produção de tijolos de solo-cimento e cal sem fins estruturais. A partir da inclusão de teores de 6 %, 8 %, 10 % e 12 % de cal ao solo, e em misturas de solo-cimento nos valores de 2 %, 3 %, 4 % e 5 %, foram conformados corpos-de-prova cilíndricos para determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo. Em seguida os mesmos foram curados, e submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples, absorção e durabilidade modificada. As composições que obtiveram os melhores resultados nos ensaios realizados nos corpos-de-prova cilíndricos serviram de parâmetro para moldagem dos tijolos maciços, que passaram pela mesma metodologia experimental anteriormente citada. As matérias-primas utilizadas, bem como as composições em que foram moldados os tijolos maciços, foram caracterizadas através de ensaios físicos e químicos, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos na pesquisa indicam que das composições estudadas, a que apresentou melhores resultados em termos de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade foi à composição ternária de solo, 10 % de cimento e 2 % de cal.

Palavras-chave: solo-cimento, cal, incorporação, tijolo maciço, propriedades.

ABSTRACT

The use of binders in the soil for the production of solid bricks is an old construction technique that has been used by several civilizations over time. At the same time, the need for environmental preservation and the tendency of scarcity of natural resources make the construction invest in researching new concepts, methods and materials for building systems for the sustainability of their economic activities. Thus arises the need to obtain building materials with low power consumption, capable of reducing the growing housing shortage of rural and urban population. Currently, research has been conducted on this topic to better understand the cementitious and pozzolanic reactions that occur in the formation of the microstructure of the soil-cement when added to other materials such as, for example, lime, and the relationship between microstructure and formed interfaces with the physical, mechanical and chemical analysis in compounds made from these ternary compositions. In this context, this study aimed to analyze the results of the influence of the incorporation of lime to the soil-cement to form a ternary mixture to produce soil-cement bricks and mortar without structural purposes. From the inclusion of contents of 6 %, 8 %, 10% and 12% lime to the soil, and soil-cement mixes in amounts of 2 %, 3 %, 4 % and 5 % were shaped-bodies of -cylindrical specimens to determine the optimum moisture content and maximum dry apparent specific weight. Then they were cured, and subjected to the tests of compressive strength, absorption and durability modified. Compositions obtained the best results in the tests performed on the bodies-of-proof cylindrical served as a parameter for molding of solid bricks, which underwent the same experimental methodology previously cited. The raw materials used, as well as compositions in which the bricks were molded solid, were characterized by physical and chemical tests, X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results obtained in the study indicate that the compositions studied, that showed the best results in terms of compressive strength, water absorption and durability ternary composition was soil, 10 % cement and 2 % lime.

Keywords: soil cement, lime, incorporation, solid brick, properties

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores de cimento	49
Tabela 2 - Nomenclatura das composições solo-cimento e cal.....	62
Tabela 3 - Limites de Atterberg e Massa específica do solo.....	72
Tabela 4 - Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das Composições solo-cimento e solo-cal.....	74
Tabela 5 - Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das Composições solo-cimento e cal	75
Tabela 6 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cal.....	76
Tabela 7 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal	79
Tabela 8 - Resistência dos tijolos solo-cimento e solo-cimento e cal	80
Tabela 9 - Absorção dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cal	82
Tabela 10 - Absorção dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal	83
Tabela 11 - Absorção de água dos tijolos solo-cimento	84
Tabela 12 - Absorção de água dos tijolos de solo-cimento e cal.....	85
Tabela 13 - Perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos	86
Tabela 14 - Perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal	87
Tabela 15 - Perda de massa dos tijolos maciços de solo-cimento	88
Tabela 16 - Perda de massa dos tijolos maciços solo-cimento e cal	89
Tabela 17 - Composição química do solo e dos aglomerantes.....	91
Tabela 18 - Quantificação das fases pelo método Rietveld para solo-cal.....	94
Tabela 19 - Quantificação das fases pelo método Rietveld para solo-cimento e cal.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da Caulinita	27
Figura 2 - Classificação adotada pela ABNT	29
Figura 3 - Forma esquemática da Alita (C3S).....	34
Figura 4 - Microscopia Eletrônica de Varredura do Ca (OH) ₂	42
Figura 5 - Mecanismo da troca de cátions no solo	53
Figura 6 - Mecanismo de troca de cátions no sistema solo-cal	54
Figura 7 - Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.....	59
Figura 8 - Solo coletado para pesquisa	60
Figura 9 - Moldagem dos tijolos maciços	65
Figura 10 - Ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos maciços.....	66
Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica do solo.....	71
Figura 12 - Distribuição granulométrica do solo	72
Figura 13 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento	77
Figura 14 – Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal.....	78
Figura 15 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal aos 300 dias	78
Figura 16 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e cal	79
Figura 17 - Resistência dos tijolos solo-cimento e solo-cimento e cal.....	80
Figura 18 - Absorção dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cal.....	82
Figura 19 - Absorção dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal.....	83
Figura 20 - Absorção de água dos tijolos solo-cimento.....	84
Figura 21 - Absorção de água dos tijolos solo-cimento e cal.....	85
Figura 22 - Perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cal	86
Figura 23- Perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento cal	88
Figura 24 - Perda de massa dos tijolos maciços solo-cimento	89
Figura 25 - Perda de massa dos tijolos maciços solo-cimento e cal.....	90
Figura 26 - DRX do solo	92
Figura 27 - DRX da cal	92
Figura 28- DRX do cimento	93

Figura 29 - DRX do S10C.....	94
Figura 30 - DRX do S7C3CH	95
Figura 31 - DRX do S8C2CH	96
Figura 32 - DRX do S10C2CH.....	97
Figura 33 - Micrografia do solo obtida por MEV-200x.....	98
Figura 34 - EDS do ponto A em destaque na Micrografia da Figura 33	98
Figura 35 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S7C3CH-10Kx	99
Figura 36 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S7C3CH-0.5Kx	100
Figura 37 - EDS da área em destaque na Micrografia da Figura 36.....	100
Figura 38 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S10C2CH-10Kx	101
Figura 39 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S10C2CH-0.5Kx	102
Figura 40- EDS da micrografia da Figura 39	102
Figura 41 - Mapa dos elementos da amostra S10C2CH destaque para o Ca ⁺⁺	103
Figura 42 – Micrografia da amostra S10C2CH com destaque para linha de varredura	104
Figura 43 – Espectro obtido na linha de varredura da Figura 42	104

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de água
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABPC	Associação Brasileira dos produtores de cal
AG	Análise Granulométrica
AP	Análise da Plasticidade
ASTM	American Society For Testing and Materials
CH	Cal Hidratada
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C4AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-H	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CEPED	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia
CTGAS	Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
HRB	Highway Research Board
H _{ot}	Umidade Ótima
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Porosidade Aparente

Pm	Perda de Massa por Imersão
RCS	Resistência à Compressão Simples
TRB	Transportation Research Board
USCS	Unified Soil Classification System
σ_f	Tensão de ruptura

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
1.1 Introdução.....	17
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 - Objetivo Geral	19
1.2.2 - Objetivos Específicos.....	19
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Solo	21
2.1.1 Definição	21
2.1.2 Origem dos Solos	22
2.1.3 Solos Tropicais.....	23
2.1.3.1 Latossolos	24
2.1.4 Argilominerais	26
2.1.4.1 Caulinita.....	27
2.1.5 Classificação Geotécnica dos solos.....	29
2.2 Aglomerantes	32
2.2.1 Cimento Portland	32
2.2.1.1 Definição.....	32
2.2.1.2 O Clínquer.....	34
2.2.1.3 Propriedades Físicas	36
2.2.1.4 Propriedades Químicas	37
2.2.2 A Cal.....	39
2.3 Estabilização dos solos.....	42
2.3.1 Solo-cimento.....	45
2.3.2 Solo-cal.....	50
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1 Matérias-Primas	60
3.1.1 Solo.....	60

3.1.2 Cimento	61
3.1.3 Cal	61
3.2 Métodos	61
3.2.1 Composições aplicadas na pesquisa	61
3.2.2 Caracterização das matérias-primas	62
3.2.2.1 Análise granulométrica	62
3.2.2.2 Limites de Atterberg	63
3.2.2.3 Massa específica	63
3.2.2.4 Teste de retração	63
3.2.3 Ensaio de compactação	64
3.2.4 Ensaio tecnológicos	64
3.2.4.1 Moldagem e cura corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos maciços	64
3.2.4.2 Ensaio de resistência à compressão simples	65
3.2.4.3 Ensaio de absorção de água	66
3.2.4.4 Ensaio de durabilidade modificada	67
3.2.5 Análise química e mineralógica das matérias-primas	68
3.2.6 Análise mineralógica das composições	68
3.2.6.1 Quantificação das fases mineralógicas das misturas através do método Rietveld	69
3.2.7 Microscopia eletrônica de varredura	69
3.2.7.1 Análise da superfície de fratura	69
4.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
4.1 Análise granulométrica	71
4.2 Limite de Atterberg e Massa Específica do Solo	72
4.3 Compactação	74
4.4 Resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos e tijolos maciços	76
4.5 Ensaio de Absorção dos corpos-de-prova cilíndricos e tijolos maciços	81
4.6 Ensaio de durabilidade modificada	86
4.7 Análise química e mineralógica das matérias-primas	91
4.8 Análise mineralógica da composição solo-cal aplicada na moldagem dos corpos-de-provas cilíndricos rompidos aos 300 dias	94

4.9	Análise mineralógica das composições.....	95
4.10	Microscopia eletrônica de varredura.....	97
4.10.1	Análise da superfície de fratura.....	99
4.11	Estudo comparativo do preço unitário para produção do tijolo maciço de solo-cimento e cal em relação ao tijolo cerâmico convencional	106
5.0	CONCLUSÕES	108
	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

Ao longo da história o homem tem explorado irracionalmente os recursos naturais para produção de diversos tipos de materiais, com intuito de suprir as necessidades básicas e tecnológicas da sociedade moderna em decorrência da intensa industrialização, do crescimento populacional e do aumento crescente do consumo de materiais diversos.

Neste contexto, uma das mais importantes necessidades do homem está relacionada à questão da moradia, à casa própria, constituindo-se o déficit habitacional um problema de difícil solução, uma vez que os custos da terra e da construção, quase sempre são inacessíveis aos trabalhadores de baixa renda, quer habitem em áreas rurais ou urbanas. Ao mesmo tempo, a necessidade de preservação ambiental e a tendência de escassez dos recursos naturais fazem com que a construção civil invista na pesquisa de novos conceitos, métodos, materiais e soluções técnicas para os sistemas construtivos visando à sustentabilidade econômica de suas atividades. Assim, surge a necessidade de se obter materiais de construção com baixo consumo de energia, com capacidade de reduzir o crescente déficit habitacional e de infraestrutura da população, sobretudo nos países em desenvolvimento, de modo a baratear os custos relativos para a implantação dos mesmos na construção. (Anjos, 2003).

Nessa perspectiva, o uso de tijolos maciços de solo-cimento torna-se uma alternativa para construção de habitações populares, uma vez que reduz o custo total da obra sem comprometer a segurança e a qualidade, possibilitando a incorporação de outros materiais, como por exemplo, rejeitos industriais, cal, escórias de alto forno, cinzas volantes, destacando-se dentre essas alternativas o uso do aglomerante cal.

Os tijolos prensados de solo-cimento, também chamados tijolos ecológicos, apresentam diversas vantagens em relação aos tijolos convencionais, tais como, maior conforto térmico e acústico, redução de desperdícios e geração de menor quantidade de entulho, verificando-se em relação ao fator econômico um menor custo de produção com alvenaria e transporte, uma vez que podem ser produzidos no próprio canteiro de obras.

Do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, uma das principais vantagens dos tijolos ecológicos é não necessitar passar pelo processo de sinterização, pois dispensa a

queima e derrubada de matas para a geração de energia. Além disso, ao contrário dos tijolos de argila queimada, que quando quebram no processo de produção não podem ser reaproveitados, os tijolos de solo-cimento podem ser moídos e prensados novamente evitando o desperdício de material.

Segundo Grande (2003) a produção de tijolos de solo-cimento está inserida no contexto de desenvolvimento sustentável vigente no setor da construção civil, cujo princípio básico está amparado no crescimento econômico planejado, na preservação do meio ambiente e na busca de uma melhor qualidade de vida, através da inclusão social.

Na estabilização química do solo para os mais diversos fins, destaca-se a aplicação do aglomerante cal na produção de tijolos maciços. Recentemente pesquisas têm sido feitas sobre esse tema, visando compreender melhor as reações cimentícias e pozolânicas que ocorrem na formação da microestrutura do sistema solo-cimento quando adicionados materiais diversos, inclusive a cal, e a relação existente entre a microestrutura e suas interfaces com as propriedades físicas, mecânicas e químicas verificadas nos compostos produzidos a partir dessas composições.

Neste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo o estudo prévio da melhor formulação em corpos-de-prova cilíndricos e em seguida a moldagem em laboratório de tijolos maciços compostos por misturas de solo-cimento com a incorporação de percentuais predeterminados de cal, com a finalidade de se obter parâmetros relativos à resistência mecânica a compressão simples, durabilidade modificada e absorção de água, em conformidade com o estabelecido pelas normas técnicas vigentes.

A priori, foram realizados ensaios de caracterização física e química dos materiais a serem usados, bem como confecção de corpos-de-prova cilíndricos para realização de ensaios de compactação para determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo das melhores composições. Em seguida à moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos os mesmos foram curados e submetidos a ensaios físicos e mecânicos para determinação das melhores composições a serem utilizados na fabricação dos tijolos maciços.

Os resultados obtidos com a pesquisa contribuirão para uma melhor compreensão dos efeitos resultantes nas propriedades físicas e mecânicas das composições de solo-cimento estudadas quando incorporado o aglomerante cal. Portanto, pesquisar, compreender e registrar essa técnica construtiva de produção de tijolos maciços

poderá servir de subsídio para novos trabalhos científicos nessa área do conhecimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- Pesquisar e analisar os efeitos da incorporação da cal em misturas de solo-cimento para produção de tijolos maciços sem fins estruturais, a partir da avaliação comparativa das propriedades físicas, mecânicas e químicas das misturas solo-cimento, solo-cal e solo-cimento e cal.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as matérias-primas através de ensaios físicos e químicos;
- Investigar e analisar o comportamento de misturas binárias solo-cimento e solo-cal e ternárias de solo-cimento e cal em tijolos maciços, por meio de ensaios de resistência a compressão simples, absorção de água e durabilidade modificada;
- Analisar a microestrutura de amostras das composições aplicadas na produção dos tijolos maciços, através dos ensaios de Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Analisar a viabilidade econômica para produção do tijolo maciço de solo-cimento e cal, quando comparado com o preço unitário do tijolo cerâmico convencional.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Solos

2.1.1 Definição

Ao longo da história, várias definições foram sugeridas ao termo solo, em razão dos objetivos e enfoques científicos abordados.

De acordo com Vargas (1977), para definir-se solo é necessário estabelecer a priori a finalidade a que se destina. Sendo assim, o conceito de solo está intrínseco a cada especialidade, visto que tem significado e abrangência conforme a atividade de quem o analisa e trabalha. Para a Ciência do Solo é importante definir as propriedades físicas e mecânicas de um determinado tipo de solo, bem como o objeto de estudo a que se propõe.

Conforme Caputo (2011), o conceito de solo compreende todo o tipo de material encontrado na superfície da terra resultante da desintegração mecânica e decomposição química das rochas pela ação do intemperismo, sendo composto pela agregação de partículas minerais, água e ar, formando um sistema ternário.

Carvalho (2004) relata que com o desenvolvimento dos métodos de estudo aplicados ao solo, cada vez mais detalhados e precisos, o solo passou a ser conceituado como um material natural resultante da interação de vários fatores, entre os quais destacam-se o clima, o relevo, a rocha mãe, o tipo de matéria orgânica, a textura e o tempo, dando-se ênfase ao fator clima e estabelecendo-se a classificação do solo denominada de Classificação climática.

Atualmente, a análise microestrutural dos diversos tipos de solo e uma melhor compreensão da origem, evolução e degradação do solo, o mesmo pode ser definido como um composto natural da superfície terrestre, constituído de materiais minerais e orgânicos resultantes das interações de fatores climáticos, geográficos, biológicos, químicos e físicos, através do tempo, que pode ser modificado pela ação do homem.

2.1.2 Origem dos Solos

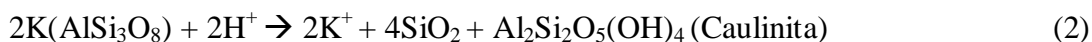
O processo no qual determinado solo é formado, assim como suas características e sua evolução no decorrer do tempo, tem sua origem pela ação de determinados fatores e processos. Pode-se dizer que o solo se desenvolve a partir dos materiais de origem, sejam eles de natureza mineral ou orgânica, por processos de transformação física e química desses materiais. (Pinto, 2008).

Grande (2003), explica que a formação dos solos decorre de variáveis relativas a variações de temperatura, umidade, decomposição química, lixiviação, etc, os quais atacam a superfície terrestre transformando gradativamente as rochas primárias e secundárias em solo. Desse modo, podemos afirmar que a alteração física e química das rochas é o processo pelo qual os materiais que são expostos na superfície terrestre são alterados ou desintegrados pela ação de agentes físicos, químicos e biológicos, dependentes, essencialmente, de duas variáveis: condições climáticas e propriedades dos materiais presentes.

Gusmão Filho (2008) ensina que o intemperismo físico pode ser entendido como o processo de desintegração das rochas expostas na superfície terrestre, pela expansão diferencial por alívio de pressão quando a rocha é exposta à superfície, e a contração e expansão diferenciais decorrentes das variações de temperatura. Por sua vez, o intemperismo químico ocorre pela degradação das rochas e minerais diversos, quando estes são expostos a infiltrações de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas na água, oriunda das precipitações pluviométricas. A água reage com os minerais presentes na rocha mãe formando cloretos, sulfatos, carbonatos, liberando calor e produzindo novos compostos químicos, dentre os quais destacamos os argilominerais.

Dentre os fatores que modificam os materiais presentes em determinado perfil de solo, a água é o agente mais importante do intemperismo químico, sendo seu efeito reagente mais intenso à medida que ela se acidifica com a dissolução de dióxido de carbono e nitrogênio atmosféricos em presença dos ácidos orgânicos resultantes da decomposição de matéria orgânica, portanto, os processos de decomposição química resultam basicamente da ação simultânea das reações químicas de hidrólise, carbonatação, oxidação e dissolução.

Um exemplo de intemperismo químico é o do feldspato potássico $[2K(AlSi_3O_8)]$ para formação de minerais de argila, sílica e carbonato de potássio solúvel é dado pela seguinte equação:



Dentre os fatores de formação do solo o tempo é o mais passivo, mas sua importância é fundamental na formação do solo, pois não basta à ocorrência dos demais fatores de formação, sendo necessário que exista um tempo suficiente para que estes fatores possam interagir de modo a formar o solo. O tempo que um solo leva para se formar é muito variável e depende dos demais fatores de formação, especialmente do clima, do material de origem e do relevo.

2.1.3 Solos Tropicais

Dentre os solos tropicais, destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os saprolíticos. Os solos lateríticos são solos bem intemperizados, característicos de áreas bem drenadas, que ocupam as camadas mais superficiais. Apresentam coloração em que predominam os matizes vermelho e amarelo, com uma macroestrutura aparentemente homogênea e isotrópica. Sua constituição mineralógica caracteriza-se pela presença de quartzo e de outros minerais resistentes mecânica e quimicamente na fração areia. (Nogami et al., 1995).

De acordo com Costa (2005), no ambiente tropical a alteração química e bioquímica das rochas tem maior influência que nos climas frios e temperados, onde predomina o intemperismo físico. Com a ação destes processos de intemperismo, são formados os chamados solos residuais, os quais posteriormente podem ser removidos pela erosão, transportados e depositados em outro local, dando origem aos solos transportados, estes por sua vez, sob condições climáticas particulares de clima tropical, sofrerão intensos processos pedogenéticos que resultarão em solos mais evoluídos os quais são denominados solos tropicais.

No Brasil predomina a ocorrência de solos tropicais úmidos, que têm o clima como fator preponderante na sua formação. Não é somente a temperatura, mas especialmente a água que percola no perfil do solo o fator principal na sua formação. O processo de formação de solos tropicais em condições de clima tropical, com temperaturas e precipitações elevadas, provoca um intemperismo muito rápido sobre a rocha matriz, originando materiais de textura fina, que são caracterizados por apresentar acidez elevada, carência em bases trocáveis, baixa saturação das bases, baixas reservas de minerais primários, tais como micas e feldspatos, presença de argila do tipo caulinita e boa drenagem. Outro fator importante é a composição mineralógica e química dos solos tropicais que somadas com o arranjo das partículas do solo, têm grande influência em seu comportamento geotécnico.

Para que um solo possa ser considerado como tropical, não basta que tenha sido formado na faixa tropical ou em região de clima tropical úmido, é indispensável que possua peculiaridades geotécnicas específicas. As classificações geotécnicas buscam associar as propriedades físicas ao comportamento dos solos, usando como parâmetro os Limites de Atterberg (LL e LP) e a granulometria.

Conforme Lovato (2007), a constituição mineral da fração argila dos solos tropicais, principalmente dos lateríticos, é um fator preponderante no comportamento peculiar dos mesmos. Ensaio de difração de raios X são comumente utilizados para a caracterização dos argilominerais, dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio presentes nesses solos.

2.1.3.1 Latossolos

O termo latossolo, cujo significado advém de later (tijolo) e solum (solo), foi proposto pelo pedólogo americano Charles Kellog, em uma conferência americana sobre classificação dos solos realizada em Washington em 1949, para designar às grandes massas de argilas endurecidas por efeito de desidratação, ricas em óxidos secundários de ferro e alumínio, de coloração vermelha ou vermelho-amarelada, contendo valores expressivos de quartzo e caulinita e avançado grau de intemperismo.

Costa (2005) define os solos lateríticos como sendo uma variedade de solo superficial pedogenético que é típico das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas.

São solos geralmente velhos e profundos, constituídos predominantemente por material mineral, sendo geralmente encontrados em florestas tropicais, em clima úmido e de temperaturas altas. As argilas constituintes desses solos são predominantemente do tipo caulinita, cujas partículas são revestidas por óxidos de ferro, responsáveis pelas cores avermelhadas. Possuem textura e granulometria uniforme, boa drenagem e baixo teor de silte, possuindo em sua composição agregados muito pequenos, o que proporciona uma alta permeabilidade à água. São solos formados pelo processo denominado latolização, que consiste basicamente na remoção da sílica e das bases do perfil dos íons (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), após transformação dos minerais primários constituintes.

São solos não hidromórficos cujos perfis são predominantemente profundos a muito profundos, sendo normais às transições graduais entre os horizontes. São, geralmente, bastante resistentes à erosão, em decorrência da baixa mobilidade da fração argila, do alto grau de floculação e da grande permeabilidade e porosidade. Experimentaram diferentes situações climáticas ao longo de sua formação, por isso tendem a homogeneizar características químicas, morfológicas e mineralógicas. Esses solos são considerados solos de mineralogia relativamente simples. Na sua fração composta por silte e areia prevalece quartzo, com pequenas quantidades de muscovita e alguns feldspatos potássicos. Quando desenvolvidos a partir de rochas básicas, prevalece a magnetita, com pequena proporção de quartzo, com destaque para o basalto no Brasil.

Os Latossolos são classificados consoante 07(sete) diferentes classes, diferenciadas com base na combinação de características como: o teor de Fe_2O_3 presente no solo, a cor do solo e a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Os Latossolos com teores elevados de areia são muito suscetíveis à erosão, e à grande percolação de água no perfil desses solos, associada à baixa CTC, pode provocar lixiviação de minerais. Nos Latossolos, de textura argilosa, a fração argila é composta principalmente por caulinita, óxidos de ferro e óxidos de alumínio (gibbsite). A baixa CTC desses solos pode ser melhorada com a elevação dos teores de matéria orgânica, uma vez que a mesma depende desse parâmetro do solo. Os Latossolos amarelos, de alta saturação por alumínio, apresentam problemas físicos relacionados com a permeabilidade e a infiltração de água devido à elevada coesão dos seus agregados, sendo o solo extremamente duro quando seco.

2.1.4 Argilominerais

Os argilominerais são silicatos de alumínio ou magnésio hidratados constituídos por silício, oxigênio e hidrogênio, ordenados em estruturas tetraédricas e octaédricas, e têm composição química e estrutura cristalina definida e constante.

A classificação dos diferentes tipos e famílias de argilominerais é feita tendo como referência sua estrutura cristalina, sendo divididos em duas classes fundamentais: os filossilicatos, que são silicatos lamelares ordenados em camadas, e os silicatos fibrosos que se ordenam em cadeias. Dentro dessas duas classes os argilominerais se dividem em outros grupos de acordo com sua estrutura e composição química.

Acchar (2006) afirma que os silicatos podem ser agrupados, conforme o arranjo espacial, em 06 (seis) classes: ciclossilicatos, filossilicatos, inossilicatos, ortossilicatos, sorossilicatos e tectossilicatos, sendo que os principais grupos de argilominerais presentes nos filossilicatos são a caulinita, ilita e montmorillonita, e o que diferenciam estes argilominerais são os tipos de estrutura cristalina e as substituições isomórficas que ocorrem na mesma.

De acordo com Costa (2005), Os argilominerais pertencem à classe dos filossilicatos e organizam-se em folhas e camadas, sendo constituídos pela alternância de unidades compostas por tetraedros de oxigênio e silício ou alumínio, e algumas vezes de Fe no centro dos octaedros de oxigênio ou OH com o centro ocupado por cátions como Al, Fe³⁺, Mg, Fe, e mais raramente Ni.

Uma das características mais importantes dos argilominerais é a capacidade de troca catiônica (CTC), que na caulinita é menor que nas ilitas e montmorillonitas devido à sua estrutura iônica. Entende-se por capacidade de troca catiônica (CTC) a capacidade dos argilominerais de atrair e trocar cátions com o meio aquoso, alterando as propriedades físicas e químicas do material. A troca de cátions ocorre por meio da camada de água adsorvida que envolve as partículas presentes no argilomineral. A ordem de substituição dos cátions depende de sua concentração na água que percola o solo e obedece a seguinte ordem de grandeza: Na < K < H < Mg < Ca.

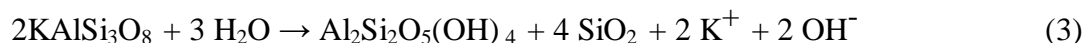
A presença dos argilominerais no solo, e sua respectiva CTC são de grande importância para a compreensão dos fenômenos químicos que envolvem o solo-cimento, pois são fatores determinantes para alcançar as propriedades físicas desejadas.

Dentre os grupos dos argilominerais destaca-se a caulinita, em virtude de ser esse argilomineral o constituinte predominante do solo usado na pesquisa.

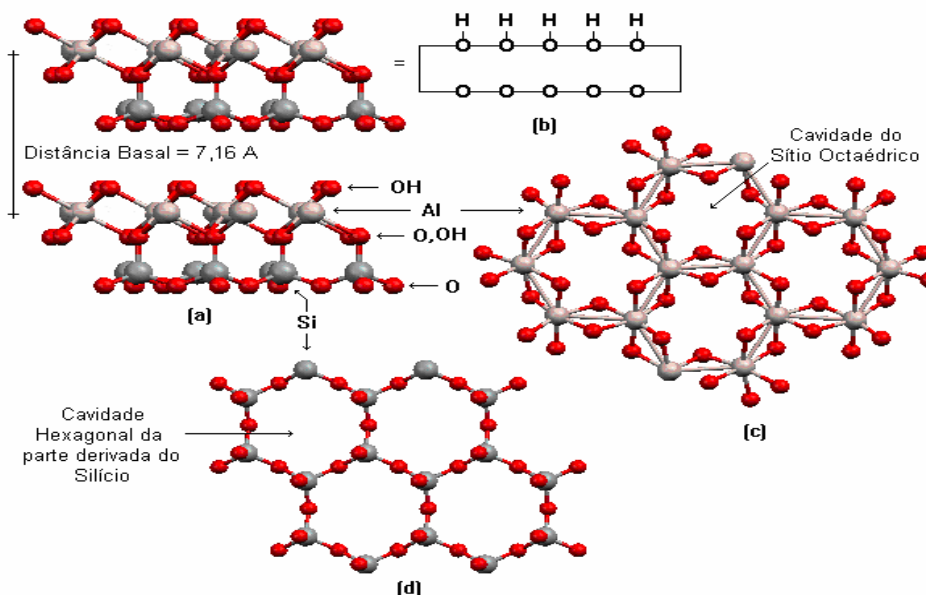
2.1.4.1 Caulinita

Conforme Marangon (2008), a Caulinita ($\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), é um argilomineral constituído basicamente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). É um aluminossilicato lamelar natural do tipo 1:1 que apresenta dois tipos de superfícies, uma constituída por uma estrutura do tipo Gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e outra por estruturas do tipo sílica (SiO_2). A lamela contendo alumínio é recoberta com grupamentos hidroxila, e a que contém silício é recoberta com átomos de oxigênio, ligadas entre si em uma única camada, através de oxigênios em comum, formando uma estrutura fortemente polar.

A formação da caulinita decorre do processo de decomposição química por hidrólise parcial do feldspato potássico, onde minerais de potássio são eliminados como exemplificado na seguinte equação:



A Figura 1 a seguir apresenta uma representação esquemática da estrutura da caulinita:



Fonte: (BRINDLEY, 1961).

Conforme Corrêa (2008), a caulinita apresenta-se, frequentemente, com baixa cristalinidade ou alto grau de desordem estrutural, e na sua estrutura cristalina os átomos de alumínio estão coordenados octaetricamente a átomos de oxigênio e grupamentos hidroxila, enquanto que os átomos de silício estão coordenados tetraetricamente a átomos de oxigênio. Lamelas adjacentes são ligadas umas às outras através de ligações de hidrogênio. A estrutura da caulinita tem sido objeto de estudo, visando determinar os tipos de defeitos estruturais (análise qualitativa) e sua abundância (análise quantitativa).

A caulinita é geralmente representada por sua fórmula mínima $[(Al_2Si_2O_5(OH)_4)]$ que corresponde à metade da sua célula unitária. Sua composição percentual é basicamente (46,54% de SiO_2), (39,50% de Al_2O_3) e (13,96% de H_2O). A sua estrutura cristalina é eletricamente neutra, não apresentando significativas substituições estruturais por outros átomos metálicos, sendo por isso considerada como um argilomineral pouco reativo. Possui distância interplanar basal da ordem de 0,716 nm (7,16 Å), característica de importância fundamental para sua identificação por difratometria de raios X.

Costa (2005) explana que os minerais do grupo da caulinita são pouco expansivos porque não ocorre hidratação das camadas estruturais, devido à distância reticular e a adsorção superficial serem muito pequenas. A adsorção superficial é incipiente, devido a estrutura ser quase eletricamente neutra, por não ocorrer ou ocorrer pouca substituição isomórfica. Podem existir pequenas substituições de Al por Fe e/ou Ti nas variedades relativamente menos cristalinas

De acordo com Santos (1989), a identificação dos argilominerais presentes na caulinita é relativamente simples, mas quando se encontram misturados é necessário que se façam análises complementares, tais como: análise química, determinação da CTC, análise térmica diferencial, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X. A caulinita apresenta o seguinte comportamento térmico:

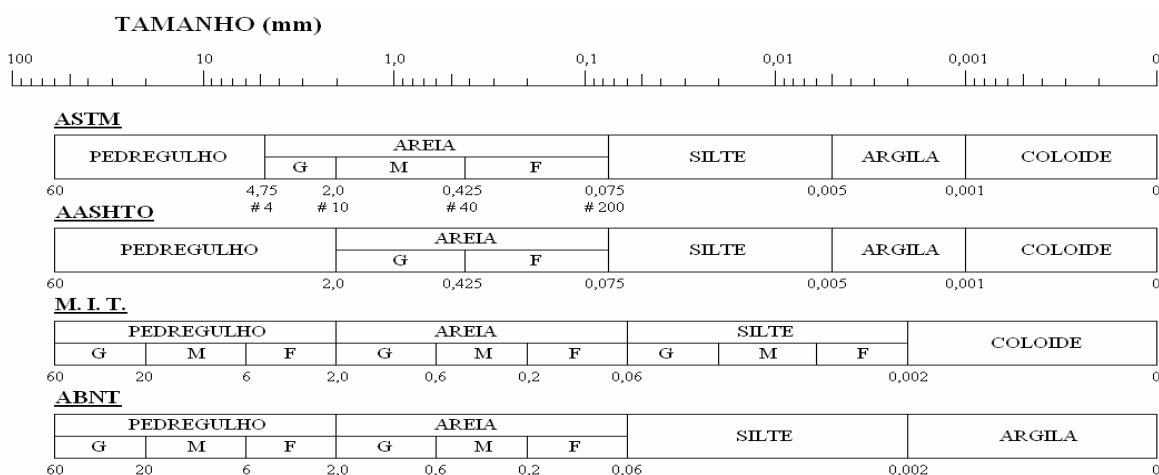
- 1) A 110 °C ocorre perda de água higroscópica e água adsorvida,
- 2) A 450 °C inicia-se a reação de desidroxilação que é completada a 600°C;
- 3) A 950 °C ocorre um pico endotérmico, com nucleação da mulita;
- 4) A 1470 °C ocorre o pico de cristalização da cristobalita;
- 5) A 1750 °C ocorre fusão completa do sistema.

2.1.5 Classificação Geotécnica dos Solos

Segundo Caputo (2011), quando os produtos da rocha alterada permanecem no local onde ocorreu a desagregação o solo passa a ser definido como residual, quando são transportados para local diferente de onde se originou, o solo passa a ser denominado como sedimentar. A desintegração física pela água, temperatura, e vento forma a fração granulométrica grossa do solo, e pela decomposição química ocorre o processo em que há a modificação química ou mineralógica da rocha de origem que dá origem à fração fina do solo, cujo produto final resulta nos argilominerais. À medida que os solos são formados, durante os processos físicos e químicos, alguns minerais e a matéria orgânica são reduzidos a partículas muito pequenas denominadas de colóides. Os colóides são frações minerais ou orgânicas menores que 0.001 mm e possuem cargas elétricas negativas ou positivas, os quais são os principais responsáveis pela atividade química dos solos. Os principais colóides encontrados nos solos são: argilas silicatadas e argilas sesquioxídicas (óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos de Fe e Al).

Conforme Cabala (2007), o solo é constituído por agregados de partículas de tamanhos diversos entre as quais há vazios, chamados de poros, que são ocupados por água e ar. Desse modo, o solo é um sistema ternário composto por três fases: sólida, líquida e gasosa. Assim, a fração sólida do solo apresenta-se na forma de uma mistura de grãos, com formas e tamanhos variados, que podem ser classificados de acordo com sua granulometria, conforme a Figura 2 a seguir:

Figura 2 - Classificação adotada pela ABNT



Fonte: (DMC/UFRGS, 2000)

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define os solos segundo as dimensões das partículas compreendidas entre determinados limites, como por exemplo:

Areia - grãos com diâmetros compreendidos entre 0.06 mm e 2.0 mm.

Silte - partículas com diâmetros compreendidos entre 0.002 mm e 0.06 mm.

Argila - partículas com dimensões menores que 0.002 mm.

As partículas de Areia são solos não coesivos, não plásticos, compostos na maior parte por minerais de quartzo e feldspato. Os Siltes correspondem a frações microscópicas do solo que apresentam baixa ou nenhuma plasticidade e baixa resistência quando seco ao ar, são compostos por partículas minerais muito finas de quartzo e algumas partículas em forma de placas fragmentadas de outros minerais. As Argilas são solos constituídos por partículas microscópicas de mica, argilominerais e outros minerais, de forma lamelar, composta de tetraedros de silício e octaedros de alumínio em diferentes relações de conformidade. Apresentam características marcantes de plasticidade quando úmidas, quando secas apresentam coesão suficiente para constituir torrões com boa resistência à desagregação. Caracterizam-se pela sua plasticidade, textura e consistência em seu estado e umidade naturais. As partículas de argila estão na maioria das vezes compreendidas na faixa denominadas de sistema coloidal (sistema coloidal $< 10^{-3}$ mm) sendo (2.0×10^{-3} mm) considerado o limite superior, segundo escala granulométrica adotada pela ASTM.

As reações que se processam no sistema composto solo-ar-água estão diretamente relacionadas às atividades das partículas do material que compõe o solo, bem como à superfície específica do mesmo, sendo tanto maior quanto menores forem as partículas presentes. Por ser a argila a fração mais fina do solo, conclui-se que esta é a parte mais reativa dos solos e a principal sede dos fenômenos químicos que nele se processam. Conforme explica Grande (2003), o comportamento mecânico de um solo depende da granulometria e da respectiva distribuição dos diversos tamanhos das partículas constituintes do solo. Contudo, solos com partículas cujas curvas granulométricas sejam semelhantes podem apresentar comportamentos diferentes devido às suas composições mineralógicas.

Os principais minerais que compõem a fração fina do solo são chamados de argilominerais, compostos basicamente de silicatos hidratados de alumínio e ferro, cuja

característica de plasticidade e capacidade de permuta de cátions (CTC) subdivide-os em três grupos principais: caulinitas, ilitas e montmorillonitas.

Devido à sua estrutura iônica, a caulinita é menos susceptível a variações de volume por absorção de água, e possui menor capacidade de troca catiônica que as ilitas e as montmorillonitas.

Nos solos argilosos as variações de volume por absorção de água estão diretamente ligadas aos limites de consistência do solo: limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), que são empregados para se descrever os estados físicos do solo.

O limite de liquidez (LL) é caracterizado pela quantidade de água que adicionada ao solo causa perda de coesão de suas partículas, o limite de plasticidade (LP) caracteriza o momento em que o solo passa do estado plástico para o estado não plástico, o índice de plasticidade (IP) é o intervalo de umidade que torna o solo plástico.

A constituição mineralógica e as propriedades físicas do solo determinam o seu comportamento quando submetidos aos processos oriundos da ação do intemperismo e do homem. As classificações dos solos usam como referência os índices de Atterberg (LL, LP e IP) e a granulometria.

Caputo (2011) acrescenta que para caracterização completa de um solo devemos determinar, além dos índices de Atterberg e curva granulométrica do solo, os seguintes índices físicos: superfície específica, peso específico, densidade específica, teor de umidade do solo, índice de vazios, porosidade, grau de saturação, entre outros possíveis de obtenção em laboratório.

Entre os diversos sistemas adotados pela Mecânica dos Solos, os Sistemas Unificados, USCS (Unified Soil Classification System) e o HRB (Highway Research Board), revelaram-se os mais utilizados por diversos organismos internacionais, diante da necessidade de uniformização e constituição de uma linguagem universalmente aceita para as finalidades da Engenharia Geotécnica.

O Sistema Unificado foi aperfeiçoado a partir do Sistema de Classificação originalmente proposto por Casagrande (1947), o qual qualifica um solo tendo como referência a resistência mecânica para uso em estruturas de fundações, sendo revisto e adotado pelo HRB. A Classificação HRB fundamenta-se na análise granulométrica, limite de liquidez e índice de plasticidade dos solos, sendo proposta para ser utilizada na área de estradas. Nesta classificação, os solos estão reunidos por grupos e subgrupos. Um

parâmetro adicionado nesta classificação é o índice de grupo (IG), que é um número inteiro variando de 0 a 20. O índice de grupo define a capacidade de suporte do solo. O limite máximo e o mínimo do IG representam solos ótimos (IG=0) e solos péssimos (IG = 20), estabelecendo uma ordenação dos solos dentro de determinado grupo. A determinação do índice de grupo baseia-se nos limites de Atterberg (LL e IP) do solo e na porcentagem de material fino que passam na peneira número 200 (0.075mm).

As classificações geotécnicas são utilizadas para inferir comportamentos mecânicos e hidráulicos desejáveis dos solos quando aplicados a determinada finalidade. Segundo Villibor e Nogami (2009), os índices de Atterberg, em conjunto com o Gráfico de Plasticidade de Casagrande servem para avaliar a variação de volume dos solos compactados, assim como para a classificação geotécnica dos mesmos.

2.2 Aglomerantes

2.2.1 Cimento Portland

2.2.1.1 Definição

A história do cimento inicia-se no Egito antigo, Grécia e Roma, onde as grandes obras eram construídas com o uso de terras de origem vulcânicas, com propriedades de endurecimento sob a ação da água. Os primeiros aglomerantes usados eram compostos de cal, areia e cinza vulcânica. Com o passar do tempo, o estudo das propriedades físicas e químicas desse material tem evoluído, inclusive com a descoberta de aditivos capazes de melhorar as suas propriedades. O nome desse material, aperfeiçoado por um construtor inglês chamado Joseph Aspdin, tem sua origem pela semelhança, na cor e na dureza, com as pedras da Ilha de Portland.

Segundo Metha et al. (2008), O cimento Portland é um pó fino constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio, que apresenta propriedades aglomerantes e ligantes, e sob a ação da água endurece, não mais se decompondo quando exposto novamente ao meio aquoso.

É composto do Clínquer e adições, sendo o primeiro o seu principal componente, estando presente em todos os cimentos, e as adições variam de acordo com as

características finais desejadas para a aplicação do produto. O clínquer é um ligante hidráulico de alta resistência que na presença de água desenvolve reação química, tornando-se primeiramente pastoso para depois endurecer e adquirir elevada resistência e durabilidade.

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o Óxido de ferro (Fe_2O_3), a magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do Clínquer. Apresenta ainda, impurezas tais como: óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), óxido de titânio (TiO_2) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio constituem os denominados álcalis do cimento. Cal, Sílica, Alumina e Óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem aproximadamente 95% da composição total dos óxidos presentes. A magnésia está presente na proporção de 2 a 3%, limitada pelas especificações técnicas da ABNT a um máximo de 5%, sendo que no Brasil, esse limite é um pouco superior (6,4%). Os óxidos menores comparecem em proporção inferior a 1%, excepcionalmente 2%. Os constituintes anteriormente relacionados e dosados são submetidos à ação do calor no forno produtor de cimento, até a temperatura de fusão incipiente, que resulta na obtenção do Clínquer.

Ao cimento Portland são adicionados alguns aditivos que têm a função de controlar o tempo de pega retardando o endurecimento da pasta (Gesso), aumentar a resistência e a durabilidade final (Escória de alto-forno), conferir maior impermeabilidade ao concreto e às argamassas (Materiais pozolânicos) e melhorar a trabalhabilidade das argamassas (fíler calcário). O cimento Portland pertence à classe dos materiais classificados como aglomerantes hidráulicos, que em contato com a água entra em processo físico-químico, tornando-se um elemento sólido com grande resistência a compressão e resistente a água e a sulfatos. O cimento Portland é normalizado pela ABCP conforme diversos tipos, dos quais podemos ressaltar:

CP I – Cimento portland comum;

CP I-S – Cimento portland comum com adição;

CP II-E– Cimento portland composto com escória;

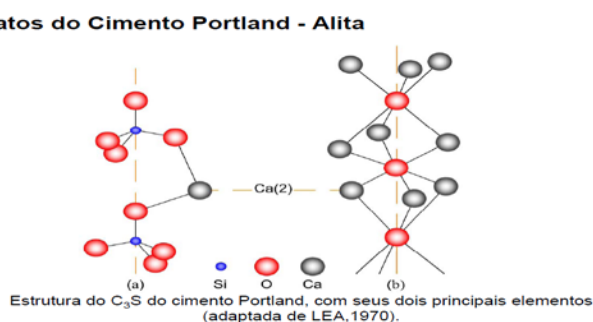
CP II-Z – Cimento portland composto com pozolana;

- CP II-F – Cimento portland composto com filer calcário;
- CP III – Cimento portland de alto-forno;
- CP IV – Cimento portland Pozolânico;
- CP V ARI – Cimento portland de alta resistência inicial;
- CP RS – Cimento portland resistente a sulfatos;
- CP BC – Cimento portland de baixo calor de hidratação;
- CPB – Cimento Portland Branco.

2.2.1.2 O Clínquer

As propriedades do cimento Portland estão diretamente relacionadas às concentrações de suas fases constituintes, principalmente a Alita (C3S), a Belita (C2S), a Ferrita (C4AF) e o aluminato de cálcio (C3A). Estas fases são resultado da queima da mistura contendo CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 . Este processo de queima atinge temperaturas entre 1450°C e 1500°C e o produto final é o clínquer que misturado e pulverizado com gesso produz o cimento Portland. O C3S, cuja composição é $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, deve ser o constituinte majoritário do clínquer após o processamento, pois é sua reação de hidratação que confere a resistência mecânica ao cimento curado. O C2S apresenta composição $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e está presente como o primeiro complexo de cal e sílica formado no aquecimento, sendo mais estável que o C3S volta a se formar durante o resfriamento. O C3A está presente principalmente na forma de $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, enquanto que o C4AF aparece como constituinte principalmente na forma $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. Na Figura 3 que segue está a representação esquemática da Alita (C3S):

Figura 3 - forma esquemática da Alita (C3S)



Fonte: Lea, 1970.

De acordo com Metha et al (2008) o C3A e o C4AF formam uma fase líquida a alta temperatura, que envolve os grãos de C3S e C2S. Ao ser aquecida, a matéria-prima passa pelo processo de evaporação da água livre, liberação da água combinada com a argila e a dissociação do carbonato de cálcio, com liberação de CaO. A clínquerização ocorre entre 1300°C e 1450°C e consiste na fusão do C3A e do C4AF, na formação dos cristais de C2S, e sua conversão em C3S na presença do material fundido. No processo de resfriamento do clínquer ocorre a solidificação do líquido contendo C3A e C4AF e a reação de decomposição de parte do C3S em C2S e CaO. A maior estabilidade do C3S ocorre em temperaturas acima de 1400°C, de maneira que, a temperaturas mais baixas, essa fase tende a se decompor em CaO e C2S. A fase C3S (Alita) fica presente à temperatura ambiente como metaestável e sua alta reatividade é fundamental para o comportamento de hidratação do cimento. O resfriamento do clínquer, para a obtenção de um alto teor de C3S ao final do processo, deve ser rápido de modo a evitar sua decomposição em cal livre e C2S (Belita). Dada a natureza do processo de fabricação do clínquer, além dos compostos de cálcio, silício, ferro e alumínio, outros compostos, inclusive compostos metálicos, estão presentes na matéria-prima e influenciam tanto na formação quanto na estabilidade do C3S.

Como visto, no processo de formação do clínquer ocorrem combinações químicas que conduzem à formação dos seguintes compostos:

Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C3S}$);

Silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C2S}$);

Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C3A}$);

Ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C4AF}$).

Dos compostos acima relacionados, o silicato tricálcico (C3S) é o maior responsável pela resistência do cimento Portland em todas as idades, especialmente até o 28º dia do primeiro mês de cura, enquanto que o silicato dicálcico (C2S) adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo responsável pelo aumento da resistência nos 365 dias iniciais.

O aluminato tricálcico (C3A) contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia, enquanto que o ferro aluminato de cálcio (C4AF) pouco contribui para essa propriedade. O aluminato de cálcio (C3A) tem sua contribuição relacionada ao calor de hidratação, especialmente no início do período de cura, sendo o silicato tricálcico o segundo componente em importância no processo de liberação de calor.

Com a adição de proporção conveniente de gesso, o tempo de hidratação é controlado, visto que o aluminato de cálcio, quando presente em forma cristalina, é o responsável pela rapidez da pega, fato que deve ser controlado para evitar fissurações na pasta de cimento. A hidratação do C3A, na presença da gipsita, forma por precipitação a estrutura cristalina da Etringita ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) que é responsável pelo enrijecimento, pega e resistência inicial da pasta de cimento nas primeiras horas da hidratação.

2.2.1.3 Propriedades Físicas

As propriedades físicas do cimento Portland são consideradas sob três aspectos distintos, a saber: propriedades do produto em sua condição natural em pó, na mistura em pasta cimento e água em proporções convenientes de dosagem, e na mistura da pasta com outros agregados.

Segundo Quarcioni (2008), a superfície específica do cimento Portland é o fator que determina a velocidade da reação de hidratação do mesmo e tem sua influência comprovada nas propriedades das pastas, das argamassas e dos concretos. A diminuição do grão melhora a resistência, particularmente a resistência na primeira idade, diminui a exsudação, aumenta a impermeabilidade e a coesão dos concretos.

No processo de hidratação, os grãos de cimento que inicialmente se encontram em suspensão, aglutinam-se uns aos outros, por efeito de floculação, conduzindo à construção de uma estrutura sólida responsável pela estabilidade do compósito final.

O processo de hidratação no decorrer do tempo conduz ao aumento da resistência e das qualidades mecânicas características do produto acabado. A pega e o endurecimento são dois aspectos do mesmo processo de hidratação do cimento, vistos em períodos de tempo diferentes. A pega na primeira fase do processo e o endurecimento na segunda e última fase, a partir da qual após um certo tempo da mistura a pasta não é mais trabalhável.

De acordo com Quarcioni (2008), o fenômeno da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, a partir do processo químico de hidratação. A pega é um fenômeno definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência, passando do estado plástico para sólido.

A caracterização da pega dos cimentos é feita pela determinação de dois tempos distintos: o tempo de início e o tempo de fim de pega, sendo os ensaios feitos com pasta de consistência normal por meio do aparelho de Vicat.

A ocorrência da pega do cimento deve ser regulada tendo-se em vista os tipos de aplicação que se deseja do material. Nas aplicações que exigem uma pega rápida, como por exemplo, nas contenções de vazamentos, são empregados aditivos aceleradores de pega ao cimento como o cloreto de cálcio e o silicato de sódio. Contrariamente, em outros processos tecnológicos necessita-se de um tempo de pega mais longo, como nas operações de injeção de pastas e lançamentos de concretos em meio aquoso, quando então se empregam aditivos químicos denominados retardadores de pega.

A propriedade física relacionada com a resistência mecânica dos cimentos é determinada pela ruptura à compressão de corpos de prova realizados com argamassa, conforme estabelecido no método da NBR 7215/97. Para o cimento Portland comum, a NBR 5732/91 exige aos três dias de idade resistência mínima de 8,0 Mpa, aos sete dias 15,0 MPa e aos 28 dias 25,0 MPa.

2.2.1.4 Propriedades Químicas

As propriedades químicas do cimento Portland estão diretamente ligadas ao processo de endurecimento por hidratação. O processo envolve estágios que compreendem a dissolução na água, precipitações de cristais e gel resultantes da hidratação dos componentes do cimento.

Segundo Mehta et al. (2008), inicialmente o anidro silicato tricálcico (C3S) se hidrolisa formando silicato bicálcico (C2S) e hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Este último precipita como cristal da solução supersaturada de cal. A seguir, o silicato bicálcico resultante da hidrólise, combina-se com a água de hidratação, adquirindo duas moléculas de água e depositando-se no estado de gel. Esse processo, quando conduzido em temperaturas elevadas, resulta numa estrutura de natureza cristalina. Os dois últimos constituintes principais do cimento, o aluminato tricálcico e o ferro aluminato de cálcio, se hidratam, resultando do primeiro cristais hidratados de Cálcio e Alumínio e do segundo uma fase semicristalina. Esse processo de endurecimento ocorre de forma muito rápida, sendo amenizado pela presença do sulfato de cálcio hidratado adicionado ao clínquer.

Experimentos demonstraram que a ação do gesso no retardamento do tempo de pega se prende ao fato de ser muito baixa a solubilidade dos aluminatos anidros em soluções supersaturadas de gesso. O processo de hidratação prossegue, de forma relativamente lenta, pela absorção do sulfato de cálcio produzindo sulfoaluminato de cálcio e outros compostos, que precipitados facilitam a solubilização dos aluminatos, responsáveis pelo endurecimento resultante da pega no tempo adequado.

Uma vez concluído o fenômeno da pega, a estabilidade química do cimento é uma característica ligada à ocorrência de expansões volumétricas resultantes da hidratação da cal e magnésia livre nele presentes. Quando o cimento contém apreciáveis proporções de cal livre (CaO), esse óxido, que se hidrata lentamente depois do endurecimento, aumenta de volume criando tensões internas que conduzem a fissurações microscópicas que podem determinar na desagregação do material. Tal fenômeno ocorre com maior razão com o óxido de magnésio, motivo pelo qual as especificações técnicas limitam a proporção da presença desses constituintes nos cimentos. Durante o processo de endurecimento do cimento, considerável quantidade de calor se desenvolve nas reações de hidratação. O desenvolvimento de calor varia com a composição do cimento, especialmente com as proporções de silicato e aluminato tricálcicos. As propriedades químicas do cimento Portland também estão relacionadas à reação álcali-agregado que ocorre de forma lenta, em presença de água, entre os álcalis do cimento e alguns agregados reativos, causando o aparecimento de um gel expansivo na interface pasta-agregado e tendo como consequência o fissuramento da pasta. Para minimizar essa reação pode-se fazer uso de cimentos com baixos teores de álcalis, ou cimentos com adições de materiais que inibam ou minimizem a reação, dentre os quais se podem incluir materiais pozolânicos e as escórias. Em síntese temos como resultado do processo químico de hidratação do cimento Portland, os materiais com estrutura cristalina definida, que de forma geral, são fases cristalinas de silicatos de cálcio anidros (C3S e C2S), aluminato (C3A) e ferro-aluminato de cálcio (C4AF), e compostos hidratados como C-S-H, o hidróxido de cálcio, a Etringita, e o monossulfato de alumínio. Na Figura 3 que segue está a representação esquemática da Alita (C3S):

2.2.2 A Cal

Segundo Guimarães (2002), o homem conheceu a cal provavelmente no período Paleolítico denominado Idade da Pedra, havendo evidências do uso da cal ao longo de toda escala evolutiva da espécie humana. Ainda, segundo o autor, foi a partir da civilização egípcia que a cal passou a ser usada regularmente nas construções, tendo o conhecimento da sua manipulação migrado para as regiões mediterrâneas vizinhas. Existem registros de sua utilização em diversas obras construídas na antiguidade que vão desde a pirâmide de Quéops, no Egito, as muralhas de Jericó e da China, e a Via Ápia em Roma.

No Brasil a cal passou a ser utilizada a partir de 1549 com a criação da primeira mineração de calcário para fabricação de cal virgem, a ser utilizada na argamassa de construção do casario da cidade de Salvador. A maioria da cal produzida no país resulta da calcinação de calcários e dolomitos metamórficos de idades geológicas diferentes e possuem pureza variável. Em geral, na região Sul e Sudeste predominam as cales provenientes calcários dolomitos e magnesianos, e na região Nordeste, Norte e Central as resultantes de calcários calcíticos.

As principais aplicações da cal no Brasil estão relacionadas às indústrias siderúrgicas, celulose e papel, açúcar, tintas, alumínio, de refratários, cerâmica, tijolos sílico-cal, petróleo, produtos farmacêuticos e alimentícios, dentre outros. É também usada para tratamento de água na correção do pH, estabilização de solos como aglomerante e cimentante, obtenção de argamassas de assentamento e revestimento, misturas asfálticas, fabricação de blocos construtivos como agente aglomerante e cimentante, entre outros. O uso da cal como aglomerante, no Brasil, deve-se a fatores ligados à produção, tais como: usinas de fabricação devido à ocorrência de calcários e dolomitos por quase todo o território nacional, à facilidade e abundância da sua oferta, o menor custo dentre os reagentes químicos alcalinos e os aglomerantes cimentantes. No mercado global da cal, é predominante a presença da cal cálcica por sua aplicação nas áreas das indústrias siderúrgicas, de açúcar e de celulose.

No processo de fabricação da cal, o calcário depois de extraído, selecionado e moído, é submetido a elevadas temperaturas em fornos industriais num processo conhecido

como calcinação, que dá origem ao óxido de cálcio (CaO) e ao gás carbônico (CO₂), a equação química dessa calcinação é dada pela seguinte equação:



O principal produto da calcinação das rochas carbonatadas é a cal virgem, também denominada cal viva ou cal ordinária. O termo cal virgem é o consagrado na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para designar o produto composto predominantemente por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação de calcários cálcicos, magnesianos ou dolomitos. A cal, também conhecida como óxido de cálcio, é um aglomerante inorgânico produzido a partir de rochas calcárias, que resulta da dissociação térmica do calcário, a temperaturas que variam de 900 °C a 1200 °C, produzindo um composto sólido, pulverulento e branco cuja representação química é dada pela fórmula química CaO.

A cal virgem é classificada conforme o teor de óxido de cálcio predominante, como indicado a seguir:

- . Cal cálcica: óxido de cálcio entre 90% e 100% dos óxidos totais presentes;
- . Cal magnésiana: óxido de cálcio entre 65% e 90% dos óxidos totais presentes;
- . Cal dolomítica: óxido de cálcio entre 58% e 65% dos óxidos totais presentes.

Por sua vez, para a obtenção da cal hidratada é necessário promover a reação da cal virgem (CaO) com a água (H₂O), conforme a seguinte reação exotérmica:



Segundo a NBR 7175, a cal hidratada é um pó seco obtido pela hidratação adequada da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. A cal é considerada aérea quando a relação (r) entre os componentes argilosos e os óxidos de cálcio e magnésio é inferior a 0,1. Neste caso, o endurecimento não ocorre sob a água, somente no ar.

$$R = \frac{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3}{\% \text{CaO} + \% \text{MgO}} < 0,1 \quad (6)$$

O Hidróxido de cálcio, também conhecido como cal hidratada, ou cal extinta, apresenta-se quando puro como um sólido branco e inodoro, possuindo em média as seguintes características: Massa específica: 2240 kg/m³, Temperatura de fusão: 580 °C, Solubilidade: 0.185g em 100g de água a 0°C. Sua qualidade depende das impurezas presentes na matéria prima de origem, granulometria e superfície específica. Dentre as impurezas presentes na composição da cal, destacam-se a sílica (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de alumínio (Al₂O₃), dependendo das mesmas a natureza cimentante da cal. Cuidados devem ser tomados com as impurezas existentes na cal, pois embora apareçam em pequenas porcentagens e possam ser consideradas inertes, elas têm, mesmo que em pequeno grau, uma certa influência sobre o produto final.

Os fatores que mais afetam o comportamento da cal são tipo de forno utilizado, quantidade de sílica e sesquióxidos, teor de carbonatos, granulometria das partículas na calcinação e atividade ou tamanho do cristalino da fração MgO. A finura da cal constitui outro fator importante no processo de hidratação, pois quanto maior a superfície específica das partículas da cal maior será a sua reatividade e plasticidade. (SANTOS, 1985).

A cal hidratada tem características aglomerantes como o cimento, diferenciando desse pelo processo de endurecimento, pois enquanto o cimento reage com água, hidratando, o endurecimento da cal hidratada ocorre pelo contato com o ar. Essa reação transforma a cal hidratada em um carbonato tão sólido quanto o calcário que a originou.

A utilização da cal hidratada é muito difundida, principalmente em argamassas para assentamento de tijolos e revestimento de paredes, devido a algumas características relativas à trabalhabilidade e durabilidade. Tradicionalmente, sempre se utilizou a cal como um dos constituintes das argamassas, porém o conhecimento científico da ação dos diferentes constituintes do aglomerante cal nas argamassas é limitado.

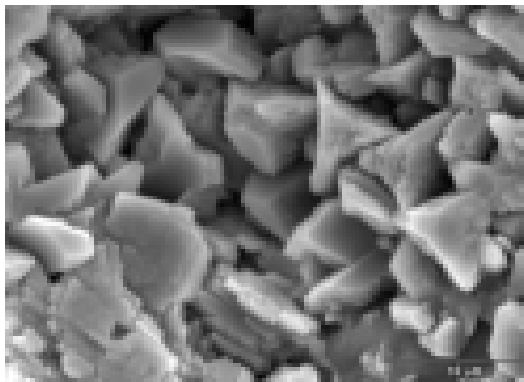
De acordo com Quarcioni (2008), pesquisas recentes enfocam questões relacionadas ao transporte de massa e a porosidade capilar da pasta de cal com relação à durabilidade e vida útil das argamassas.

Neste contexto, a busca de matérias-primas alternativas faz com que a cal seja considerada hoje um produto viável como substituto do cimento, em alguns casos, tendo em vista ser um produto que requer menor gasto de energia para sua fabricação, e ser mais acessível à população devido a seu baixo custo. Deve-se ressaltar que o Brasil possui

grandes reservas naturais de calcário, possuindo, portanto, condições para produção desse material de uso milenar.

Segue na Figura 4 uma imagem da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) :

Figura 4 - MEV do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 3000X



Fonte: Guimarães, 2002.

2.3 Estabilização dos Solos

De acordo com Behak (2007), a estabilização dos solos consiste em modificar as características do sistema (solo, água e ar) com a finalidade de obtenção de propriedades necessárias a uma aplicação particular. Trata-se de um processo no qual ocorre uma estruturação, resultante da reorientação das partículas sólidas do solo por meio de procedimentos físicos ou químicos, alterando a quantidade relativa de cada uma das três fases que constituem o solo.

A estabilização confere ao solo uma maior resistência estável às cargas aplicadas ou à erosão, por meio de compactação, correção de sua granulometria e da sua plasticidade ou de adição de substâncias que lhe ofereça uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de seus grãos.

Estabilizar um solo é propiciar-lhe resistência ao cisalhamento e à abrasão, de modo a suportar cargas ou agentes externos sem deformações excessivas ou prejudiciais em qualquer condição climática.

Segundo Grande (2003), os princípios que regem a estabilização dos solos tendem a conferir ao produto final melhor estabilidade dimensional, aumento da resistência

mecânica para fins definidos pela utilização, diminuição da permeabilidade, controle da fissuração por retração na secagem, resistência à erosão e abrasão superficial e conseqüentemente, aumento da durabilidade do material.

Conforme Caballa (2007), a estabilização dos solos favorece o preenchimento e a redução do volume dos vazios influenciando sobre a porosidade e a permeabilidade do solo e ainda melhora a aderência entre grãos, conferindo maior compactidade ou densidade ao solo influenciando diretamente na resistência mecânica.

A estabilização pode ser mecânica, física e química. A estabilização mecânica baseia-se em compactar o solo através de uma ação mecânica, com aplicação de uma energia. Esse método altera a densidade, a resistência mecânica, a compressibilidade, a permeabilidade e a porosidade.

Para Caputo (2011), podemos agrupar os tipos de estabilização de solos em duas categorias: estabilização mecânica e estabilização por adição de aglomerantes. Na estabilização mecânica, a granulometria do solo é conservada ou corrigida pela mistura com um ou mais materiais, antes da compactação, procurando-se assim aumentar a coesão.

A estabilização física age diretamente na textura dos solos ao adicionar frações de grãos de diferente granulometria, aperfeiçoando assim as proporções entre areia, silte e argila, causando melhor empacotamento dos grãos. Ao escolher o tipo adequado de estabilização é preciso considerar a finalidade da obra, as características dos materiais e as propriedades do solo a corrigir.

A estabilização química acontece quando outros materiais são adicionados ao solo alterando suas propriedades ou quando grãos e o material reagem, aglutinam-se e cobrem os grãos.

A estabilização dos solos com cimento é a técnica mais adotada formando o material conhecido como solo-cimento, uma mistura do solo peneirado, cimento Portland e água, que compactados a um teor de umidade ótimo e máxima densidade, forma um material estruturalmente resistente. No processo de estabilização do solo por aglomerante hidráulico, quando há a hidratação do cimento, há uma mudança na carga elétrica no meio argiloso através da troca de cátions, havendo atração entre as partículas, fazendo com que estas se reúnam formando partículas maiores, determinando desta forma, a perda da plasticidade da mistura.

Conforme Neves (2008), diversos processos de estabilização são aplicados visando melhorar as propriedades do solo, dentre os quais sobressai à estabilização química pela adição de cimento Portland comum. Resulta desse processo um material denominado solo-cimento que teve sua aplicação inicial direcionada para a execução de rodovias sendo as primeiras pesquisas dirigidas para esse fim. Posteriormente, o uso do material se difundiu para outras finalidades.

Quase todos os solos podem ser estabilizados com cimento. Aqueles que necessitam de baixas quantidades de aglomerante para serem estabilizados produzem um solo-cimento mais viável economicamente. Quando há uma uniformidade na granulometria da areia e os teores de silte e de argila forem elevados faz-se necessário o uso de um alto teor de cimento, aumentando assim o custo da mistura.

Segundo a ABCP (1986), a composição granulométrica é determinante na estabilização do solo-cimento, traçando parâmetros que correlacionam teores de cimento e viabilidade econômica de sua aplicação.

Solos finos em geral exigem elevados teores de cimento para a estabilização. Já os solos granulares se estabilizam pela cimentação nas interfaces de contato entre seus agregados grosseiros exigindo assim um teor menor desse aglomerante. Quanto mais fina a granulometria do solo, maior é a sua área específica, o que significa que a área a ser envolvida pelo aglomerante é maior. De uma maneira geral, solos com granulometria variada são ideais, pois os espaços existentes entre os grãos são preenchidos por partículas menores do próprio solo.

A finalidade que se busca com a estabilização de determinado solo é aumentar a sua resistência, o que se consegue atuando em sua coesão. Os valores desse parâmetro dependem, principalmente, de três fatores: granulometria, compactidade e umidade.

A granulometria interfere através da fração grossa (areia) e fina (silte e argila) do material. A primeira entra como elemento inerte, contribuindo para o atrito interno e, a segunda, como elemento aglutinante influenciando na coesão.

A compactidade desejável pode ser obtida por compactação, melhorando a qualidade do solo, não só quanto à resistência, mas também nos aspectos: permeabilidade, compressibilidade e absorção de água. O efeito da umidade influencia predominantemente na coesão dos solos, evidenciando a importância da fração fina do solo sobre o seu comportamento.

Na estabilização por adição de aglomerantes juntam-se ao solo uma substância, geralmente o cimento ou a cal, que aumente a sua coesão e o impermeabilize, impedindo a diminuição da sua resistência pela ação da água.

Conforme preceitua Guimarães (2002), a adição de cal ao solo argiloso, durante a mistura para a moldagem de tijolos maciços, provoca uma mudança em suas propriedades, tornando-o mais granular e menos sensível às variações de umidade, havendo redução dos valores de expansão decorrentes das reações ocorridas na superfície das partículas. O resultado dessas reações é a formação de uma nova microestrutura cristalina e a ocupação dos vazios existentes entre os agregados do solo.

3.3.1 Solo-cimento

Conforme Lima (2006), o uso abundante da terra crua pelo homem vem desde a antiguidade e é confirmado nos sítios arqueológicos das antigas civilizações do mundo. O seu emprego tornou-se mais intensivo a partir de 3.000 a.C por povos que se instalaram em vales com áreas argilosas e inundáveis de grandes rios. O solo-cimento é uma evolução dos materiais de construção quando comparado com o adobe, tendo sua origem em variações introduzidas em nas misturas do solo com as cinzas vulcânicas.

Ao longo da história, em termos de aplicação do solo-cimento, pode-se citar como pioneiro o engenheiro inglês Bradley (1891) como o precursor desta mistura, ao utilizá-la no tratamento de leitos de estradas e pistas para veículos de tração animal, no sul da Inglaterra. Nos EUA em 1916, a utilização do cimento como agente estabilizador de solos teve início quando foi empregado para solucionar problemas causados pelo tráfego de veículos de rodas não pneumáticas, de acordo com a Portland Cement Association (1960).

Segundo a ABCP (1986), o solo-cimento é o produto resultante da mistura íntima de solo, cimento portland e água que compactados na umidade ótima adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento. Ao solo-cimento quando compactado deve ser adicionada água em quantidade suficiente ao solo de modo a possibilitar a máxima densificação da mistura e a ocorrência das reações de hidratação do cimento.

Conforme Mercado (1990), solo-cimento é um processo físico-químico de estabilização no qual resulta uma estrutura decorrente da reorientação das partículas

sólidas do solo, com a deposição de substâncias cimentantes nos contatos intergranulares, e com a alteração da quantidade relativa das fases que constituem o solo.

Para Grande (2003), o interesse pelo assunto no Brasil surgiu a partir de 1936 com a regulamentação de seu uso pela ABCP, sendo inicialmente empregado na confecção de bases e sub-bases de pavimentos de estradas, posteriormente, passou a ser usado em diversos tipos de construções, tais como: revestimento de canais, diques, reservatórios, barragens de terra, estabilização de taludes, tijolos, blocos, painéis e paredes monolíticas. A partir da década de 1970 o solo-cimento tornou-se objeto de intensas pesquisas principalmente da ABCP, do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia (CEPED) e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). A primeira obra no Brasil em solo-cimento foi no ano de 1945, quando construída uma casa de bombas para abastecimento das obras do aeroporto de Santarém no Pará, desde então o solo-cimento passou a ser utilizado na construção e pavimentação de estradas, revestimento de barragem de terra, fabricação de tijolos, entre outras aplicações.

Os tijolos e blocos de solo-cimento constituem uma das alternativas para a construção de alvenaria. Na sua produção usa-se uma mistura constituída de solo, cimento e água devidamente prensada, de forma a produzir os mesmos com variadas dimensões e formatos. Esses elementos, após pequeno período de cura, garantem resistência à compressão simples similar à dos tijolos e blocos cerâmicos, sendo a resistência tanto mais elevada quanto maior for à quantidade de cimento empregada. No entanto, o percentual de cimento deve ser limitado a um valor que confira ao material curado a necessária qualidade, sem aumento do custo de fabricação.

A ABCP recomenda que os elementos fabricados sejam estocados em uma área para cura, mantidos úmidos e saturados por um período nunca inferior a 07 dias.

Os tijolos, blocos e as paredes monolíticas de solo-cimento apresentam vantagens em relação ao sistema convencional, podendo ser produzidos no canteiro de obras com o próprio solo local, reduzindo o custo de transporte, a regularidade das formas, além de ser um produto que não agride o meio ambiente.

Alguns fatores influenciam nas propriedades do solo-cimento, tais como o tipo de solo, teor de cimento aplicado, umidade, energia de compactação, mistura e condições de cura. Dentre os fatores mencionados, o tipo de solo a ser estabilizado é o preponderante a ser considerado, embora teoricamente, qualquer solo possa ser estabilizado com cimento.

No entanto, limitações de ordem econômica e vinculadas a trabalhabilidade delimitam a faixa de solos estabilizáveis, sendo o teor de cimento o fator condicionante, pois o custo de fabricação do solo-cimento aumenta com o teor de argila presente no solo.

De acordo com Pinto (2001), outros fatores que influenciam nas propriedades do solo-cimento estão relacionados ao teor de matéria orgânica, que deve ser limitado a 2% no máximo, por reduzir a resistência do solo-cimento, e a presença de certos tipos de sais, principalmente os sulfatos, que são prejudiciais pelo fato de provocarem a recristalização nos poros da mistura produzindo a desagregação do solo-cimento. Como regra geral pode-se afirmar que propriedades mecânicas dos solos relacionadas à impermeabilidade, resistência aos esforços mecânicos, coesão e durabilidade melhoram com a adição de cimento e com o processo de compactação da mistura.

A escolha do tipo de solo a ser utilizado na mistura solo-cimento não se refere diretamente a uma característica específica do mesmo, pois qualquer solo endurece satisfatoriamente quando misturado com cimento e devidamente compactado, no entanto o problema é determinar quais os solos são viáveis economicamente para execução do solo-cimento, uma vez que existem solos que necessitam de elevados teores de cimento, tornando as operações de execução bastante onerosa.

Segundo Segantini (2000), quanto à granulometria os solos arenosos são considerados os mais adequados, pois há existência de grãos de areia grossa e pedregulhos é extremamente benéfica, e se tratam de materiais inertes que têm apenas a função de enchimento. Isso favorece a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar os grãos menores. Os solos devem ter, no entanto, um teor mínimo da fração fina, pois a resistência inicial do solo-cimento deve-se à coesão da fração fina compactada. A experiência tem demonstrado que quando os solos possuem um teor de silte mais argila inferior a 20%, não se consegue uma resistência inicial que propicie a sua compactação.

Segantini (2000) propõe que a classificação do solo-cimento deve ser feita em duas categorias: SCC - solo-cimento compactado; e SCP - solo-cimento plástico. No caso do SCC a água deve ser adicionada em quantidade suficiente, de modo a possibilitar a máxima compactação e a ocorrência das reações de hidratação do cimento. Para o caso do SCP a água deve ser adicionada até que se obtenha um produto de consistência plástica, de aspecto similar ao de uma argamassa de emboço.

Assim, os solos economicamente empregáveis na execução do solo-cimento seriam os que não exigissem elevados teores de cimento e que não tornasse as operações de execução difíceis. A quantidade de cimento a ser utilizada na dosagem deve ser feita em função das características do solo, do teor de umidade, da densidade a ser obtida no processo de compactação e das características que se pretende obter para o material resultante.

A Norma Geral de Dosagem proposta pela ABCP determina o teor de cimento capaz de garantir à mistura a permanência de suas características melhoradas. Essa determinação pode ser feita através de ensaios de durabilidade ou de resistência à compressão simples de amostras moldadas em laboratório. Segundo a ABCP, a dosagem pode ser resumida nas seguintes operações:

- a) identificação e classificação do solo;
- b) escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação;
- c) execução do ensaio de compactação do solo-cimento;
- d) escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade;
- e) moldagem de corpos de prova para ensaio de durabilidade;
- f) execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem;
- g) escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados do ensaio.

O tempo de duração dos ensaios, principalmente os de durabilidade que levam aproximadamente 40 dias para apresentarem resultados, constitui um fator limitante para aplicação desse método.

Visando a otimização dos valores relativos à dosagem, a PCA (Portland Cement Association) apresentou um método simplificado para a mistura de solo-cimento que pode ser resumido nas seguintes operações: ensaios de caracterização dos solos, ensaio de compactação de solo-cimento, determinação da resistência à compressão simples aos 07 (sete dias), e comparação entre a resistência média obtida e a resistência admissível para o solo-cimento estabelecido pela Norma.

De acordo com o estudo técnico ET-35 da ABCP (1986), a dosagem do solo cimento deve ser feita por meio de ensaios de laboratório, com interpretações dos resultados em função de critérios preestabelecidos para as possíveis aplicações do material. Na Tabela 1 que segue são apresentados os teores de cimento recomendados e utilizados pelo

laboratório central de engenharia civil da CESP/SP, para dosagem das misturas de solo-cimento segundo a classificação do solo proposta pela HRB, atual TRB.

Tabela 1 – Teores de cimento

Classificação HRB	Teor de cimento (%)
A1-a	5,0
A1-b	6,0
A2	7,0
A3	8,0
A4	10,0
A5	10,0
A6	12,0
A7	13,0

Fonte: ABCP, 1986

Na determinação do teor de cimento os estudos são dirigidos no sentido de garantir a coesão necessária aos grãos do solo fortemente unidos pelo aglomerante, quando o solo-cimento é solicitado pelos esforços provenientes das variações de temperatura e de umidade, uma vez que os grãos da mistura quando desagregados não apresentam mais a mesma coesão.

A Norma Geral de Dosagem proposta pela ABCP procura determinar o teor de cimento capaz de garantir à mistura a permanência de suas características melhoradas, tendo como fundamento a análise do comportamento de corpos-de-prova com diferentes teores de cimento.

Nessa conjuntura, diversas pesquisas sobre a aplicação do solo-cimento para a produção de tijolos maciços, a serem utilizados em alvenaria não convencionais, têm sido realizadas com o objetivo de redução dos custos das construções de unidades habitacionais visando à adoção de um sistema construtivo sustentável com intervenção mínima no meio ambiente.

Conforme Grande (2003), uma das vantagens dos tijolos maciços de solo estabilizado com cimento é a possibilidade de incorporar outros materiais na sua fabricação, como agregados produzidos com entulho reciclado, sílica ativa, cinzas volantes, escórias

de alto forno, cal hidratada, argila calcinada, dentre outros materiais oriundos de rejeitos industriais.

A ABCP menciona as principais vantagens dos tijolos e blocos de solo-cimento:

- a) Podem, em geral, ser produzidos com o próprio solo local e no canteiro de obras, reduzindo ou evitando o custo de transporte;
- b) A regularidade de suas formas e faces requer argamassa de assentamento e de revestimento de espessura mínima e uniforme;
- c) Podem dispensar o uso de revestimento, desde que protegidos da ação direta da água;
- d) Por dispensar a queima não consomem combustível na fabricação;
- e) Controle de perdas, uma vez que a alvenaria modular minimiza o desperdício;
- f) Baixo custo em comparação às alvenarias convencionais;
- g) Durabilidade e segurança estrutural;
- h) Funcionalidade de seus equipamentos, permitindo uma operação direta no canteiro de obras independente de sua localidade;
- i) Eficiência construtiva devido ao sistema modular, pelo qual os tijolos são assentados com pouca quantidade de argamassa;
- j) Os tijolos podem ser produzidos com furos internos que permitem a passagem de tubulações sem a necessidade de cortes ou quebras;

A NBR 10832/89 estabelece os critérios para a seleção dos solos, destinados à fabricação dos tijolos maciços de solo-cimento:

- % de material passando na peneira ABNT N° 4 (4.8 mm) - 100%
- % de material passando na peneira ABNT N° 200 (0.075 mm) - 10 a 50%
- Limite de Liquidez $\leq 45\%$
- Limite de Plasticidade $\leq 18\%$

2.3.2 Solo-cal

Quando um solo não tem as características geotécnicas requeridas quanto à sua resistência, torna-se necessário corrigi-lo com a adição de componentes ou de agentes químicos, devendo a escolha técnica ser baseada na economia e na finalidade a ser alcançada. A estabilização ou melhoria dos solos instáveis com adições de cal é uma das

mais antigas técnicas empregadas pelo homem, destacando-se exemplos de obras encontradas ao sul da Itália, como a Via Ápia, e num trecho da muralha da China.

Segundo Lopes Júnior (2007), a aplicação da cal como aditivo no tratamento de solos para os mais variados fins é um dos mais antigos métodos de estabilização química conhecido. Os critérios recomendáveis para uso da cal são dados por parâmetros relativos à presença de elementos reativos nos solos, utilização de solos não ácidos e utilização de solos com baixo teor de matéria orgânica.

De acordo com Guimarães (2002), quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água ocorrem simultaneamente algumas reações químicas, sendo a estabilização química caracterizada por duas etapas distintas que envolvem períodos de tempo que pode levar meses a anos. O sistema se baseia na inter-relação de elementos presentes no solo, dos componentes do meio ambiente e da cal adicionada. O solo influi com seus constituintes principais compostos de argilas e quartzo, já o meio ambiente exerce influência com fatores relacionados à temperatura, água e ar (CO_2), e a cal hidratada com a expressão de seus teores de óxidos de cálcio e de magnésio. As principais características dos solos que influenciam as reações solo-cal estão relacionadas com o pH do solo, o teor de matéria orgânica, a permeabilidade, a presença excessiva de sódio livre, a mineralogia da fração argila, ao grau de intemperismo, a presença de carbonatos, a relação sílica x alumina e a relação sílica x óxidos.

Alguns dos mecanismos das reações envolvidas na estabilização ou na melhoria dos solos com a cal ainda não são bem conhecidos, mas sabe-se que no processo predominam efeitos físico-químicos de interação da cal com o solo. A cal provoca reações de curto prazo de tempo em decorrência da troca iônica e das modificações nas condições de carga das superfícies das partículas dos solos, e modificações à longo prazo resultantes das reações de cimentação envolvendo a cal e os elementos minerais presentes no solo. As modificações de curto prazo induzem à floculação dos solos, já as reações que ocorrem em longo prazo são denominadas pozolânicas. Assim, quando a cal é adicionada ao solo ocorrem fenômenos químicos relacionados com a capacidade de troca iônica do solo, fenômenos de floculação e aglomeração, reações pozolânicas e a recarbonatação dos hidróxidos de cálcio e magnésio.

A reação da cal com o solo, tem início imediatamente após a incorporação desta ao mesmo, resultando na alteração do pH do meio, tornando-o mais alcalino. Reações de

floculação ocorrem acompanhadas da troca iônica entre as argilas presentes no solo e a cal, dando início as alterações das propriedades do solo, com o aumento da capacidade de suporte, redução da expansão ou contração, melhoria da plasticidade e da sensibilidade à água. Posteriormente, as reações pozolânicas ocorrem com formação de compostos sílico-aluminosos decorrentes do ataque da cal aos minerais argilosos e ao quartzo presentes no solo. Paralelamente, acontecem os fenômenos de carbonatação devido ao ataque do anidrido carbônico aos óxidos hidratados da cal, completando o processo químico. Essas alterações provocadas no solo pela adição da cal são influenciadas por fatores do meio ambiente, entre eles a temperatura, a composição do ar atmosférico, principalmente a quantidade de oxigênio e anidrido carbônico, e os esforços mecânicos realizados para obter a estabilização. O tempo de cura que é proporcionado à mistura também influencia no processo de estabilização química da mistura solo-cal.

De acordo com Patrício (2011), para estabilizações comuns são normalmente praticadas dosagens na ordem de 6 a 12% de cal. No entanto, a dosagem correta do teor de cal para um determinado tipo de solo deve ser obtida através de ensaios de laboratório.

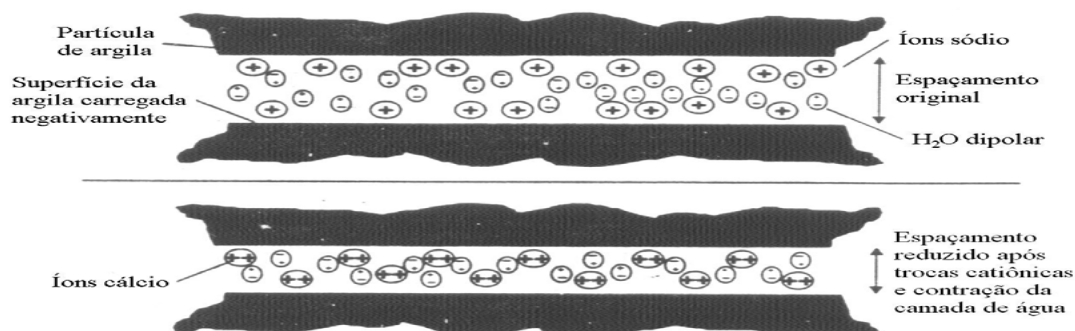
A adição da cal aos solos argilosos provoca mudanças quanto à plasticidade, granulometria, aos limites de Atterberg (limites de plasticidade, de liquidez e índice de plasticidade), às variações de volume e à resistência mecânica, ocorrendo também mudanças quanto aos valores relativos à energia de compactação, à densidade, ao teor de umidade ótimo e à retenção de água no solo.

As propriedades das misturas solo-cal no estado verde são decorrentes da atividade físico-química e são manifestadas como modificações que ocorrem nos índices de consistência, nos parâmetros de compactação e no volume de vazios. As modificações nos índices de consistência são dadas pelo aumento do limite de plasticidade e da diminuição do limite de liquidez do solo, reduzindo-se o índice de plasticidade dos solos com adição da cal. As modificações nos parâmetros de compactação são dadas pelo aumento da umidade ótima de compactação e da diminuição da massa específica aparente seca alcançada, e em razão da nova condição granulométrica aumenta-se a permeabilidade da mistura no estado fresco. Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, compressão da dupla camada elétrica e adsorção de cálcio. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência devido à formação de produtos cimentantes e

pela carbonatação. A troca catiônica inicia o processo de estabilização muito rapidamente e é seguida pela floculação e aglomeração devido à deficiência de carga positiva na superfície do argilomineral, atraindo cátions e moléculas de água para a superfície das moléculas carregadas negativamente, neutralizando a deficiência energética. Desse processo resulta a separação em camadas, chamada de dupla camada difusa, cuja ordem de adsorção preferencial de cátions comuns, associados com os solos é dada pela série: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{Al}^{3+}$, da direita para a esquerda, ou seja, cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência. Como a cal é uma fonte de cálcio livre, a sua adição em quantidade suficiente cria uma concentração de Ca^{++} , que serão adsorvidos na superfície dos argilominerais.

A floculação e aglomeração causam mudanças na textura da argila, pois sua estrutura é alterada de plana, e paralela, para uma orientação aleatória de partículas. O fenômeno da floculação é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, pelo aumento do pH e pela redução da espessura da dupla camada difusa, através de trocas catiônicas. O mecanismo de troca de cátions é mostrado na Figura 5 a seguir.

Figura 5 – mecanismo da troca de cátions no solo

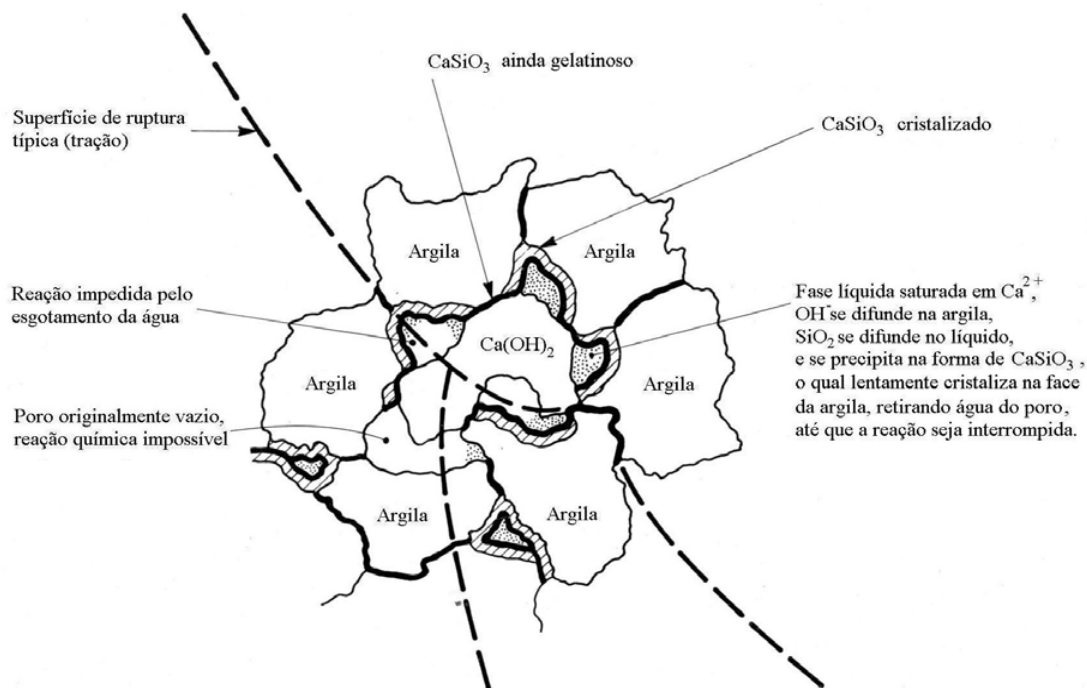


Fonte: Lovato, 2004

Por sua vez, as reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica das misturas do solo com a cal. Esse aumento ocorre devido às concentrações de sílica, alumina e ferro, presentes no solo, que reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes. Nos solos lateríticos as concentrações de sílica, alumina e ferro estão presentes nos argilominerais combinados quimicamente de diversas

formas. Segue na Figura 6 o mecanismo da troca de cátions quando a cal é adicionada ao solo.

Figura 6 - mecanismo da troca de cátions no sistema solo-cal



Fonte: Ingles e Metcalf, 1973

Conforme Guimarães (2002), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina presentes nos argilominerais sejam dissolvidas. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio, e não cessarão enquanto houver Ca(OH)₂ reagindo com a sílica e/ou alumina disponíveis no solo. Em seguida, os géis de silicato resultantes da reação cobrem e ligam as partículas de argila preenchendo os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos, ocorrendo à reação em presença da água, cuja função é transportar os íons cálcio e hidroxila para a superfície do argilomineral. Segundo o autor, a cal hidratada quando adicionada ao solo provoca aumento em seu pH, tornando instáveis alguns dos seus constituintes e possibilitando trocas catiônicas entre os minerais de silício e alumínio e a combinação desses íons com o cálcio, formando compostos estáveis de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. O resultado dessas reações, decorrentes do aumento de temperatura no momento da mistura,

é a formação de uma nova microestrutura cristalina e a ocupação dos vazios existentes entre os agregados do solo.

No caso dos solos lateríticos, a presença de óxidos e hidróxidos de ferro torna a análise do processo um pouco mais complexa, devido à influência do ferro na reação do solo com a cal ser de difícil avaliação, havendo evidências na literatura de que a ocorrência do ferro pode não ser um fator positivo nas reações. Sua influência poderá ser negativa para a reação do solo com a cal devido ao fato da presença dos sesquióxidos na superfície do argilomineral inibir a reação entre o cálcio e a sílica. Esse comportamento evidencia a necessidade de considerar a influência das constituições química e mineralógica dos solos no comportamento mecânico das misturas solo-cal.

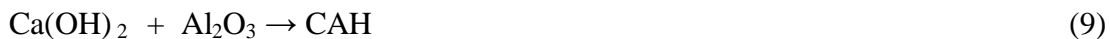
Outro parâmetro capaz de avaliar o nível de interação do solo com a cal é o índice de pozolanicidade do solo em relação à cal, levando em consideração a variação da capacidade de troca catiônica do solo, uma vez que a atividade pozolânica de um solo laterítico está intimamente ligada ao conteúdo de sílica e alumina presentes no estado amorfo. A sílica e a alumina acentuam o percentual da fração argila e aumentam a atividade coloidal. Portanto, a estabilização do solo depende da disponibilidade de sílica para as reações pozolânicas, ao contrário da presença de matéria orgânica que influencia negativamente o processo de estabilização, retardando as reações, e produzindo pequenos ganhos de resistência, uma vez que solos com teor de matéria orgânica maiores que 1% não responde bem a estabilização.

De acordo com Azevedo et al. (2010), a cimentação do solo deve-se à reação química entre a cal, a água e os elementos pozolânicos do solo, dando origem a compostos de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio semelhantes ao produto obtido pela hidratação do cimento Portland nas misturas de solo-cimento.

Bouth (2005) alega que na adição da cal ao solo verifica-se uma dissolução dos argilominerais em um ambiente mais alcalino, resultando na formação de silicatos de alumínio e cálcio semelhantes aos produzidos nas misturas de solo-cimento.

Em Resumo, as reações pozolânicas entre os solos lateríticos e cal são representadas pelas expressões abaixo:





onde: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; H = H₂O

CSH: silicato hidratado de cálcio

CAH: aluminato hidratado de cálcio

CSAHF: silico-aluminato ferroso hidratado de cálcio

Segundo Guimarães (2002), outra reação importante para o mecanismo de estabilização do solo com a cal é fenômeno químico da carbonatação, combinação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente no ar atmosférico e que tende a produzir carbonato de cálcio. Embora de origem diferente da reação pozolânica, também tem a característica de ação imediata, estando normalmente restrita à superfície exposta da mistura moldada.

Preceitua Guimarães (2002), que a formação do carbonato de cálcio resulta em cimentações que acentuam a estabilidade da peça moldada, porém não desempenha papel fundamental nas características do sistema solo-cal, sendo, no entanto, considerado um composto cimentante fraco que provoca aumento moderado em termos de ganho de resistência. Segundo o autor, sempre ocorre à formação de calcita em solos tratados com cal, mas sua quantidade é afetada pelo teor de cal disponível durante o processo de cura, ressaltando que é recomendável a compactação, imediatamente após a execução da mistura do solo com a cal, com o objetivo de reduzir a porosidade do material e a circulação interna de ar reduzindo, assim, o fenômeno da carbonatação.

Como visto, quando se adiciona cal a um solo argiloso suas propriedades físicas são alteradas, apresentando, geralmente, melhores resultados. Essas alterações dependem de diversos fatores, tais como o tipo de solo argiloso, qualidade e teor da cal, a energia de compactação e as condições de cura. As condições de cura são variáveis que dependem da umidade e temperatura, enquanto que as condições de compactação é função da energia de moldagem e do modo de aplicação. As propriedades do material endurecido estão relacionadas com o aumento da capacidade resistente e com a permeabilidade, devendo ser avaliadas por meio de ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água.

Nesse contexto, a aplicação no solo de aglomerantes para a estabilização do mesmo, estimulou pesquisas científicas na busca do aperfeiçoamento das técnicas de utilização do

solo em misturas estabilizadas com a cal, por meio de processos de fabricação de tijolos maciços.

De acordo com Silva (2005), o estudo da produção de tijolos utilizando matérias-primas alternativas como o solo-aglomerante compactado tem sua qualidade comprovada em termos de resistência mecânica, resistência às intempéries, isolamento térmico e acústico, etc. De fato, embora a fabricação de tijolos seja uma técnica construtiva antiga, pode-se afirmar que os tijolos prensados de terra crua é uma forma relativamente recente de uso da terra como material de construção, pois apesar de seu uso milenar, a terra só passou a ser utilizada na forma comprimida por equipamentos na década de 1950, quando o pesquisador colombiano G. Ramires teve a idéia de criar uma prensa manual para fabricação de tijolos.

Barbosa et al. (2002) aduz que a ideia da utilização da terra compactada é antiga, porém a forma comprimida por equipamentos somente aconteceu com a criação da primeira prensa manual na década de 50.

De acordo com Carvalho et al. (2000), O processo de fabricação desses tijolos é bastante simples e adequado aos sistemas de produção automatizada. Utiliza-se um dispositivo mecânico com sistema de alavanca para prensagem. O princípio fundamental desse equipamento consiste em submeter à mistura de solo, cimento ou cal e água a pressões elevadas dentro de moldes metálicos, o que resulta em tijolos com formas e dimensões desejadas. Após pequeno período de cura, o tijolo fabricado apresenta resistência à compressão similar à de bloco cerâmico, sendo sua resistência tanto mais elevada quanto maior for à quantidade de aglomerante empregada. No entanto, esse consumo deve ser limitado a um teor ideal, que confira ao tijolo a resistência necessária com o menor custo.

Akasaki (2001), avaliando o comportamento de misturas de solo-cal como alternativas para a fabricação de tijolos maciços crus, verificou a grande potencialidade da mistura. Segundo o autor, o teor de cal recomendado para se alcançar maior resistência da mistura variou entre 4 a 10%, tendo o teor de 10% da cal alcançado os maiores valores de resistência à compressão simples e tração na compressão diametral no decorrer de 180 e 360 dias.

Segantini et al. (2007) consideram que aos tijolos produzidos a partir das misturas solo-cal se impõem as mesmas exigências das misturas solo-cimento. Conforme prescritos

pela NBR 8491(1984), os valores médios mínimos de resistência à compressão simples devem ser em torno de 2,0 MPa aos 07 dias de cura, tolerando-se valores individuais da ordem de 1,7 MPa. Para o ensaio de absorção de água, tem-se que o limite máximo imposto é de 20% para valores médios, e de 22% para os valores individuais.

Patrício (2011) obteve valores médios de resistência à compressão simples em tijolos de solo-cal aos 28 dias de 0,9 MPa e aos 60 dias 1,0 MPa. Ao incorporar 25% de resíduo de demolição na mistura de solo-cal obteve valores de 1,0 MPa e 1,6 MPa respectivamente.

Figueiredo (2011) em pesquisa realizada com corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal e solo-cal incorporado com 25% de resíduo de demolição, aos 28 e 60 dias, obteve valores médios de resistência a compressão simples da ordem de 1,53 MPa e 3,03 para misturas solo-cal e 3,43 e 3,91 para misturas solo-cal incorporadas com 25% de resíduo, respectivamente.

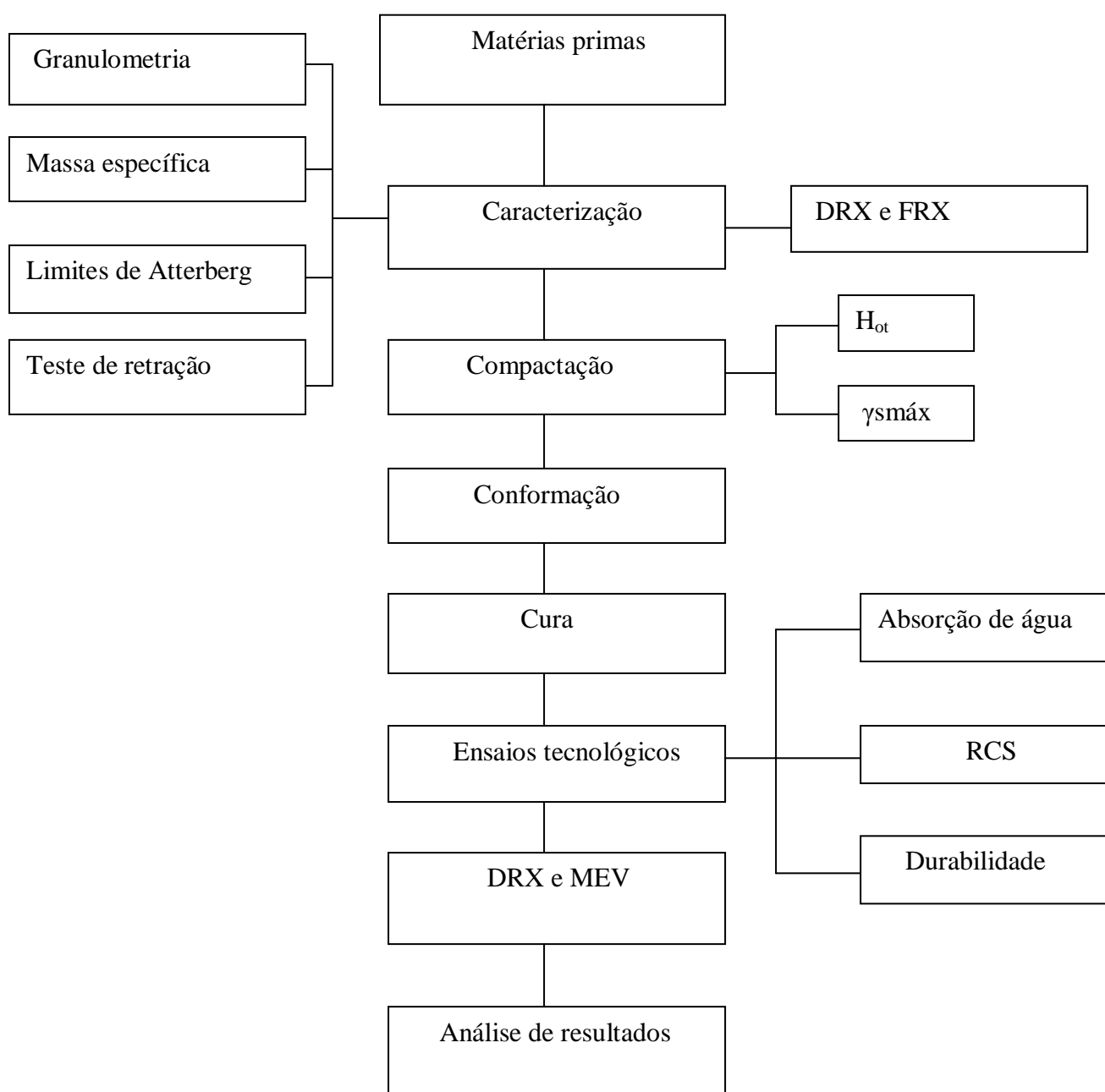
CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho consistiu na caracterização física e química das matérias-primas utilizadas, e na determinação dos parâmetros de resistência a compressão simples, absorção de água e de durabilidade modificado dos produtos resultantes, conforme fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas



Foram realizados ensaios de laboratório para a caracterização do solo, dos aglomerantes, das composições solo-aglomerante e de amostras dos tijolos maciços prensados. A etapa de caracterização física dos materiais foi realizada nos Laboratórios de Mecânica dos solos e Materiais de construção do Núcleo de Tecnologia Industrial da UFRN. As análises química, mineralógica e a microscopia eletrônica de varredura foram feitas nos laboratórios da Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais (PPGCEM) e no laboratório de Metrologia do Centro de Tecnologia do Gás (CTGAS).

3.1 Matérias Primas

3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado na BR – 101 no trecho compreendido entre as cidades de São José de Mipibú e Goianinha próximo ao rio Baldun, no estado do Rio Grande do norte, por ser uma jazida de fácil acesso, localização próxima a UFRN e apresentar textura adequada ao objeto da pesquisa. Depois de seco, destorroado, peneirado na malha 48 mm e caracterizado, o solo foi classificado conforme o padrão da Highway Research Board (HRB) e tipificado como categoria A₆ e pelo Unifiel Soil Classification System (USCS) como um solo arenoso com fração fina silto-argilosa, cujas características geotécnicas são representativas dos solos tropicais lateríticos existentes nessa região do estado do RN. Segue na Figura 8 uma ilustração da amostra do solo:

Figura 8- amostra do solo coletada para pesquisa



3.1.2 Cimento

Na pesquisa foi aplicado o cimento composto CP II F-32 (NBR-11578/97), que apresenta propriedades condizentes com as recomendações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para produção de composições solo-cimento. O produto foi adquirido no comércio local da cidade de Natal-RN.

3.1.3 Cal

Nos experimentos realizados foi aplicada cal cálcica hidratada, CH-II, (NBR-7175/03), conforme recomendação da Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC), Programa Setorial da Qualidade da Cal Hidratada para a construção civil (2010), conhecida comercialmente como Rebocal e fabricada no município de Campina Grande, PB.

3.2 Métodos

3.2.1 Composições aplicadas na pesquisa

Segundo orientação de Sherwood (1993), que recomenda o valor mínimo de 6% de aglomerante para a estabilização química dos solos, foram aplicados percentuais em relação à massa do solo de 8%, 10% e 12% do somatório dos aglomerantes nas composições do solo-cimento e cal, enquanto que o percentual máximo adotado em relação à massa do solo foi de 12% de aglomerante, estabelecido em função da viabilidade econômica para produção dos tijolos maciços. Inicialmente, foram utilizados valores de cimento ou cal na proporção (6, 8, 10 e 12%) em relação à massa do solo com objetivo de determinar valores de resistência a compressão simples e absorção de água, condizentes com os limites estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, conforme demonstrado na tabela 1. Com os resultados obtidos nas composições citadas anteriormente, delimitou-se percentuais de cimento (4, 5, 6, 7, 8 e 10%) e cal (2, 3, 4, e 5%) em relação à massa do solo para moldagem das misturas de solo-cimento e cal. A nomenclatura das misturas solo-cimento e cal, aplicadas na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos maciços encontram-se dispostas na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Nomenclatura das composições solo-cimento e cal

Nomenclatura	Denominação das misturas
S	Solo
S6C	Solo + 6% Cimento
S8C	Solo + 8% Cimento
S10C	Solo + 10% Cimento
S12C	Solo + 12% Cimento
S6CH	Solo + 6% Cal
S8CH	Solo + 8% Cal
S10CH	Solo+ 10% Cal
S12CH	Solo+ 12% Cal
S4C4CH	Solo +4% Cimento +4% Cal
S5C3CH	Solo +5% Cimento +3% Cal
S5C5CH	Solo +5% Cimento +5% Cal
S6C2CH	Solo +6% Cimento +2% Cal
S6C4CH	Solo +6% Cimento +4% Cal
S7C3CH	Solo +7% Cimento +3% Cal
S8C2CH	Solo +8% Cimento +2% Cal
S10C2CH	Solo +10% Cimento + 2% Cal

3.2.2 Caracterização das matérias primas

As matérias primas utilizadas na pesquisa foram caracterizadas pela técnica de análise granulométrica, ensaio de compactação, limites de Atterberg, teste de retração, ensaio de análise mineralógica por difração de raios X (DRX), e análise química por fluorescência de raios X (FRX)).

3.2.2.1 Análise granulométrica

Após a coleta, o solo foi conduzido para o laboratório de mecânica dos solos da UFRN, onde foi colocado para secar em espaço coberto protegido da ação do intemperismo. Concluída a secagem natural, o mesmo passou pelo processo de destorroamento, sendo em seguida peneirado na malha 4.8 mm (N⁰4) e acondicionado em recipientes de PVC com capacidade para 50 litros. Em seguida foram preparadas as amostras de solo para os ensaios de compactação e caracterização (NBR 6457/86), ou

seja, determinação do teor de umidade e composição granulométrica do solo, segundo prescrições da NBR 7181/88. Também foi realizado ensaio de distribuição granulométrica do solo no laboratório de física experimental da UFRN através do Granulômetro a laser - CILAS 920.

3.2.2.2 Limites de Atterberg

Para determinação dos limites de consistência do solo, foram realizados os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) que são as variáveis que determinam o índice de plasticidade (IP) do solo, e expressam o nível de trabalhabilidade do mesmo. O índice de plasticidade do solo é determinado pela equação:

$$IP = LL - LP \quad (11)$$

Para fins de solo-cimento a ABCP (1985) estabelece que o limite de liquidez seja inferior a 45% e que o limite de plasticidade seja inferior a 18%. Nos ensaios para determinação dos limites de consistência foram aplicados os preceitos normatizados pelas NBR 6459/84, NBR 7180/88 e NBR 10832/89.

3.2.2.3 Massa específica do solo

A determinação da massa específica do solo 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, relacionando a massa com o volume dos sólidos.

3.2.2.4 Teste de retração

Após as etapas de coleta, secagem e destorroamento 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.

3.2.3 Ensaio de Compactação

Após a análise granulométrica do solo, algumas amostras caracterizadas, de acordo com a NBR 6457/86, foram utilizadas para realização do ensaio Normal de compactação do solo, conforme NBR 7182/88, visando à determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo. Procedimento semelhante ao anterior foi realizado nas composições solo-aglomerante, conforme prescreve a norma NBR 12023/12.

3.2.4 Ensaio Tecnológicos

3.2.4.1 Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos e dos tijolos maciços

Nessa etapa foram moldados 20 (vinte) corpos-de-prova cilíndricos para cada composição solo-aglomerante, a partir dos valores obtidos nos ensaios de compactação para determinação da umidade ótima (NBR 12023/12), sendo 12 (doze) corpos para o ensaio de resistência à compressão simples, 03 (três) para o ensaio de absorção de água e 05 (cinco) para o ensaio de durabilidade modificado. A mistura dos componentes foi realizada manualmente.

Após a moldagem e pesagem, os corpos-de-prova foram levados à cura durante 07, 28 e 56 dias, em câmara úmida adaptada à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de aproximadamente 90%.

De posse dos melhores resultados alcançados nos ensaios de RCS, absorção de água e durabilidade, foram escolhidas as misturas binárias de solo-cimento e ternárias de solo-cimento e cal para moldagem dos tijolos maciços. Para cada composição solo-aglomerante(s) selecionada foram prensados 20(vinte) tijolos maciços, sendo 12 (doze) para o ensaio de RCS, 03 (três) para o ensaio de absorção de água e 05 (cinco) para o ensaio de durabilidade modificado. Essas misturas foram realizadas mecanicamente utilizando-se da betoneira Motomil-MB-150L, 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. Uma vez moldados os mesmos foram submetidos ao processo de cura citado anteriormente. A Seguir a Figura 09 ilustra a moldagem dos tijolos maciços:

Figura 09 - Moldagem dos tijolos maciços



3.2.4.2 Ensaio de Resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos e dos tijolos maciços

Os ensaios de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos maciços foram realizados no laboratório de materiais de construção da UFRN, através da máquina universal AMSLER com célula de carga de 10.000Kg, aos 07, 28 e 56 dias, conforme Tabela 04 a seguir, obedecendo-se os preceitos das normas NBR 12025/12 e NBR 8492/84 respectivamente. No caso específico dos tijolos maciços foi realizado o rompimento de algumas composições aos 180 dias, conforme Tabela 8 que segue. Os valores individuais resultantes do ensaio de RCS para os corpos de prova cilíndricos e tijolos maciços, foram obtidos conforme as equações (12) e (13):

$$R_c = Q/A_c \quad (12)$$

$$R_t = Q/A_t \quad (13)$$

Onde:

R_c = Resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos;

R_t = Resistência à compressão simples dos tijolos maciços;

Q = carga aplicada (Kgf);

$A_c = \pi d^2/4$, área dos corpos-de-prova cilíndricos (cm^2), sendo $d = 9,96$ cm;

$A_t = C \times L$, área dos tijolos maciços (cm^2), sendo $C = 21,0$ cm e $L = 10,0$ cm;

Segue na Figura 10 detalhe do ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos maciços:

Figura 10 - Ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos (a) e dos tijolos maciços (b)



(a)

(b)

3.2.4.3 Ensaio de absorção de água

Na determinação da absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos maciços obedeceram-se as recomendações da NBR 13555/96 e NBR 8492/84 respectivamente. Para a realização do ensaio, os corpos-de-prova foram pesados e colocados em estufa retilínea FANEM, até atingirem constância de massa. Em seguida os corpos foram 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, calculou-se o percentual de absorção para os corpos-de-prova cilíndricos e dos tijolos maciços prensados. Os valores individuais de absorção de água (AA), expressos em porcentagem (%), foram obtidos pela equação (14), enquanto que a absorção média foi determinada pela média aritmética de três repetições.

$$AA = (M_2 - M_1) \times 100 / M_1 \quad (14)$$

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 (%);

3.2.4.4 Ensaio de durabilidade modificado

O ensaio de durabilidade modificado foi aplicado nos corpos-de-prova cilíndricos de algumas composições e nos tijolos maciços adaptando-se os preceitos previstos no método de ensaio DNER-ME 203/94, os quais 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 (2010) 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 necessário, portanto, a etapa de escovação.

Na determinação da perda de massa, aplicando os preceitos do ensaio de durabilidade modificada, depois de completados 28 dias de cura os corpos-de-prova cilíndricos e os tijolos maciços foram pesados e secos em estufa a 105 °C por 24 horas. Após a pesagem foram imersos em água por 24 horas. Em seguida foram retirados e pesados, obtendo-se assim, a massa inicial natural, a massa inicial seca e a massa úmida. Este procedimento finalizou o primeiro ciclo de 48 horas. Ao término do primeiro ciclo os corpos-de-prova e os tijolos maciços foram secos por 42 horas em estufa, pesados e depois mergulhados em água pelo período de 6 horas. Em seguida foram retirados e pesados, completando assim o segundo ciclo de 48 horas. Esse procedimento experimental repetiu-se 10(dez) vezes. Ao final do ensaio foram realizados 12 ciclos de 48 horas, entre secagens e molhagens. Após o último ciclo, os corpos-de-prova e os tijolos maciços foram secos em estufa a 105 °C por 24 horas e pesados, determinando-se a massa final seca.

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

$$P_m = (M_i - M_f) \times 100 / M_f \quad (15)$$

Onde:

P_m = Percentagem de perda de massa dos corpos-de-prova cilíndrico ou tijolos maciços;

M_i = Massa seca inicial dos corpos-de-prova cilíndricos ou tijolos maciços;

M_f = Massa seca final dos corpos-de-prova cilíndrico ou tijolos maciços

3.2.5 Ensaio de análise química e mineralógica das matérias-primas

Os materiais aplicados na pesquisa foram peneirados na malha 200 mesh, e submetidos à ensaios de caracterização de Espectrometria de fluorescência de raios X, aparelho Shimadzu EDX-700, e Difração de raios X, aparelho Shimadzu XRD-6000, radiação de $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura (2θ) de 0° a 80° , para determinação da composição química do solo, cimento, cal, e identificação das fases mineralógicas presentes nas matérias primas.

3.2.6 Análise Mineralógica das composições solo-cimento e cal

As amostras mais representativas das composições solo-cimento e cal dos tijolos maciços rompidos aos 56 dias foram submetidas a ensaios de Difração de raios X, aparelho Shimadzu XRD-6000, para identificação das fases mineralógicas das mesmas. As amostras selecionadas para realização do ensaio anteriormente citado foram previamente imersas em álcool etílico absoluto por 24 horas e secas em estufa a 110°C , por um período de 06 horas, e posteriormente foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados, segundo o método de preparação das amostras para porosimetria por intrusão de mercúrio, conforme recomenda Duart (2008). A utilização desse procedimento tem por finalidade retirar a água higroscópica presente nas amostras das misturas de solo-aglomerante(s) e induzir a paralisação das reações de hidratação e pozolânicas, evitando a alteração da microestrutura do material. Esse procedimento foi adotado tendo em vista a impossibilidade de realização imediata dos ensaios de análise química das composições utilizadas para produção dos tijolos maciços.

3.2.6.1 Quantificação das fases mineralógicas através do método Rietveld

Aos melhores resultados obtidos nos ensaios de difração de raios X, aplicou-se o refinamento pelo método Rietveld, uma metodologia que permite o refinamento das fases cristalinas presentes e a análise quantitativa de todo difratograma. O método gera um difratograma calculado a partir das informações das fases presentes e as suas proporções relativas, ajustando, assim, o difratograma real.

3.2.7 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura

O estudo da caracterização da morfologia do solo e das composições solo-cimento e cal e da superfície da fratura das amostras de tijolos maciços submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples foi realizado através da análise de imagens obtidas pelo ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura. As amostras selecionadas para realização do ensaio, depois de peneiradas na malha 200 mesh (0.074mm), foram analisadas no Microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca Hitachi 3M 3000.

3.2.7.1 Análise da superfície de fratura

Após a realização dos ensaios tecnológicos foram retiradas amostras das composições solo-cimento e cal que obtiveram valores mais significativos para estudo de caracterização da superfície de fratura através da técnica de MEV e EDS. O estudo da microestrutura foi realizado sobre os fragmentos recuperados do ensaio de resistência à compressão simples das composições citadas. As amostras selecionadas para realização dos ensaios anteriormente citados foram previamente imersas em álcool etílico absoluto por 24 horas e secas em estufa a 110 °C, por um período de 06 horas, e posteriormente foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados, segundo o método de preparação das amostras para porosimetria por intrusão de mercúrio. Esse procedimento foi adotado tendo em vista a impossibilidade de realização imediata dos ensaios de análise química das composições utilizadas para produção dos tijolos maciços.

CAPÍTULO 4

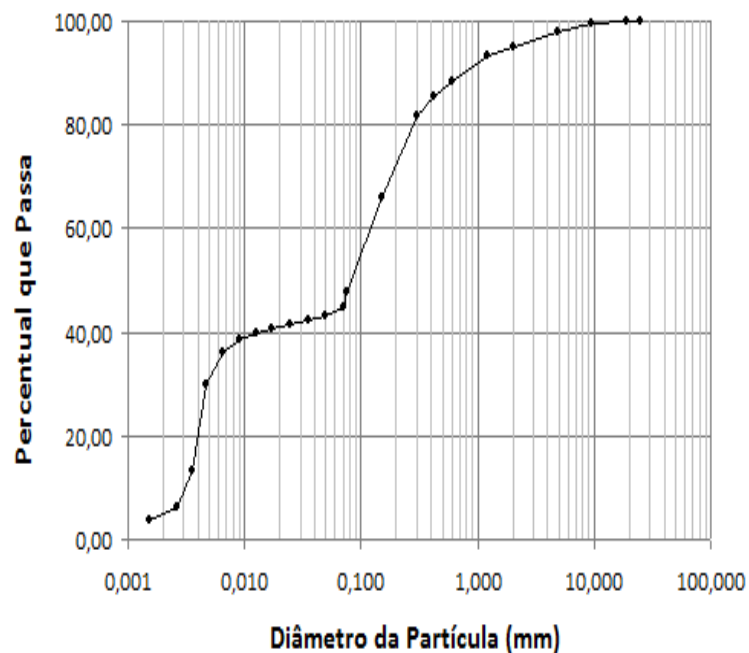
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise granulométrica

O solo depois de seco e destorroado foi submetido a ensaio de análise granulométrica, conforme a NBR 7181/88. O resultado encontra-se representado conforme gráfico na Figura 11, a seguir:

Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica

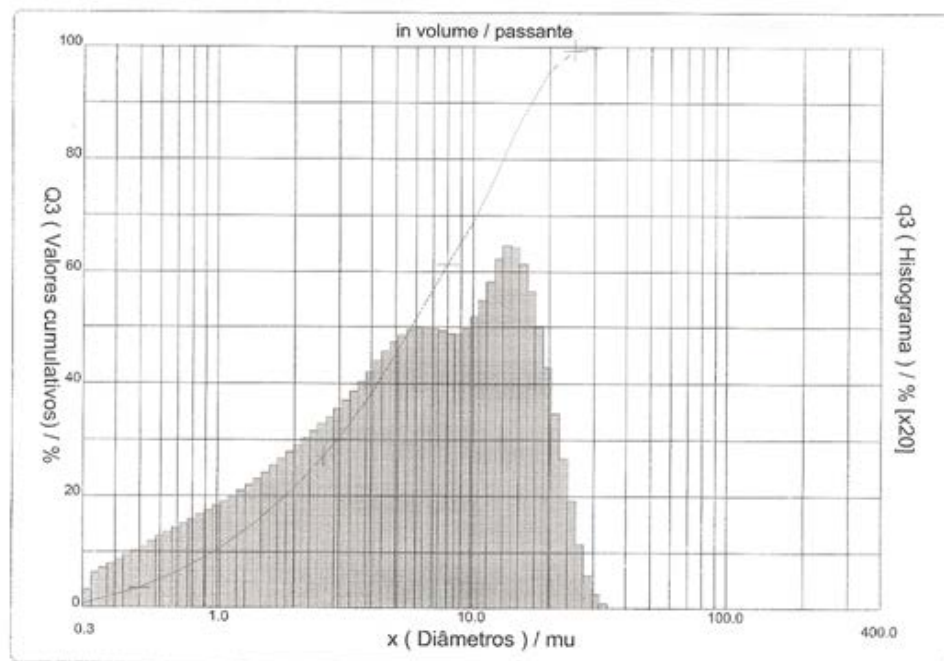


Conforme disposto no gráfico acima, os percentuais do solo que passam na peneira N°4 (4.8mm), é igual a 97,73%, na peneira N°40 (0.42mm) é 85,31% e na peneira N°200 (0.075mm) o percentual é da ordem de 47,70%. Os resultados obtidos revelam que o solo escolhido atende aos parâmetros previstos pelo ABCP para as misturas solo-cimento, ou seja, aproximadamente 100% dos grãos passando na peneira N° 4, 15 a 100% passando na peneira N° 40 e 10 a 50% passando na peneira N° 200. Deve-se ressaltar que o solo escolhido, também obedece aos critérios estabelecidos pela NBR 10832/89 para a produção de tijolos maciços de solo-cimento.

Com o objetivo de obtenção de dados que confirmassem os ensaios de análise granulométrica e sedimentação do solo em estudo, realizou-se no laboratório de física

experimental da UFRN o ensaio de distribuição granulométrica por difração a laser, verificando-se que o solo apresentou comportamento bi-modal com ordem de diâmetros $D_{10} = 0,97\mu\text{m}$, $D_{50} = 5,75\ \mu\text{m}$, $D_{90} = 16,96\ \mu\text{m}$ e diâmetro médio $D_M = 7,6\ \mu\text{m}$, conforme gráfico representado na Figura 12, a seguir:

Figura 12 - Distribuição granulométrica do solo (Granulômetro)



4.2 Limites de Atterberg e Massa específica do solo

Os ensaios realizados para determinação dos índices físicos (limite de liquidez, limite de plasticidade e massa específica dos sólidos) apresentaram os seguintes resultados na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Limites de Atterberg e Massa específica do solo

Limite de Liquidez	28,40%
Limite de Plasticidade	17,80%
Índice de Plasticidade	10,60%
γ_{solo}	2,49g/cm ³

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios de liquidez e plasticidade, Caputo (2011) classifica o solo como medianamente plástico ($7 < IP < 15$), já a NBR 10832/89 estabelece o limite máximo de 45% para o LL e 18% para LP, logo o solo objeto da pesquisa atende os parâmetros exigidos pela norma citada para utilização como solo-cimento. Outro parâmetro que indica o potencial de atividade da fração argila do solo é o índice de atividade (I_a), que segundo Rojas (2008) fundamentado no modelo proposto por Skempton, avalia o potencial de plasticidade e coesão dos solos presentes nas partículas argilominerais com diâmetros inferiores a $2\mu\text{m}$. O índice de atividade pode ser determinado através da relação entre o IP do solo e a porcentagem do mesmo inferior a $2\mu\text{m}$, conforme a equação :

$$I_a = IP / (\% \text{ } \emptyset < 2\mu\text{m}) \quad (15)$$

Onde:

$I_a = 2,69$ (índice de atividade)

$IP = 10,6\%$ (índice de plasticidade)

$\emptyset < 2\mu\text{m} = 3,94\%$ (diâmetro das partículas do solo inferiores a $2\mu\text{m}$)

Em função dos valores de índice de atividade (I_a), as argilas podem apresentar baixa atividade ($I_a < 0,75$), atividade normal ($0,75 < I_a < 1,25$), e alta atividade ($I_a > 1,25$). O solo estudado apresentou o índice de atividade igual a 2,69, que segundo Skempton, enquadra a fração argila do solo como de alta atividade, reafirmando o disposto na NBR 10832/89 para fins de utilização nas misturas de solo-cimento.

Corroborando com argumentação exposta, o teste de retração (CEPED) realizado, a priori, na amostra do solo coletado não apresentou fendas transversais na parte central da mesma que ultrapassassem o limite de 2,0 cm, apresentando fissuras inferiores a 1,0 cm, fator que comprova a ausência de argila expansiva.

4.3 Compactação

Os valores do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima das composições de solo-aglomerante moldadas, determinados pelos ensaios de compactação Proctor Normal, encontram-se representados conforme disposto nas Tabelas 4 e 5.

Conforme disposto na Tabela 4, as misturas de solo-cimento apresentaram um aumento médio no teor de umidade ótima em relação à obtida para o solo. O resultado obtido deve-se à incorporação da porção fina proveniente do cimento ao solo, levando a um aumento médio da superfície específica das partículas presentes na mistura solo-cimento, resultando no acréscimo do percentual de água necessária para agregação das partículas inertes do solo. Em relação ao peso específico aparente seco máximo das misturas solo-cimento observa-se uma redução mínima em relação ao obtido para o solo.

Tabela 4 – peso específico aparente seco máximo e umidade ótima

Composições	$\gamma_{sm\acute{a}x}(g/cm^3)$	$H_{ot}(\%)$
S	1,84	14,81
S6C	1,79	15,80
S8C	1,80	15,26
S10C	1,81	15,10
S12C	1,82	14,90
S6CH	1,75	16,25
S8CH	1,74	16,39
S10CH	1,73	16,80
S12CH	1,70	17,27

As misturas de solo-cal apresentaram um aumento médio no teor de umidade ótima em relação à obtida para o solo. Verificou-se a tendência de redução do peso específico aparente seco máximo à medida que foram aumentados os percentuais de cal na mistura. A maior solubilidade do hidróxido de cálcio e o menor poder aglomerante em relação ao cimento, bem como a floculação das partículas do solo quando adicionada a cal

contribuem para o aumento dos vazios da mistura solo-cal, tendo como conseqüência o aumento da porosidade da composição e a diminuição do peso específico aparente seco máximo para uma mesma energia de compactação aplicada.

Conforme disposto na Tabela 5 a seguir, as misturas de solo-cimento e cal apresentaram um aumento médio no teor de umidade ótima em relação à obtida para o solo. O resultado obtido deve-se à incorporação da porção fina proveniente do cimento e da cal que eleva a concentração de hidróxido de cálcio e requer mais água para a hidratação dos grãos de cimento e cal, bem como para a flocculação e aglomeração das partículas, contribuindo para o aumento dos vazios da mistura solo-cimento e cal, cuja conseqüência é o aumento da porosidade da composição e a diminuição do peso específico aparente seco máximo, para uma mesma energia de compactação aplicada. O aumento da umidade ótima reduz o peso específico aparente seco máximo da mistura.

Tabela 5 - peso específico aparente seco máximo e umidade ótima

Composições	$\gamma_{sm\acute{a}x}(g/cm^3)$	$H_{oi}(\%)$
S	1,84	14,81
S4C4CH	1,74	16,39
S5C3CH	1,73	16,90
S5C5CH	1,75	16,30
S6C2CH	1,74	16,46
S6C4CH	1,75	16,23
S7C3CH	1,78	16,10
S8C2CH	1,76	16,20
S10C2CH	1,81	14,98

4.4 Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e dos tijolos maciços

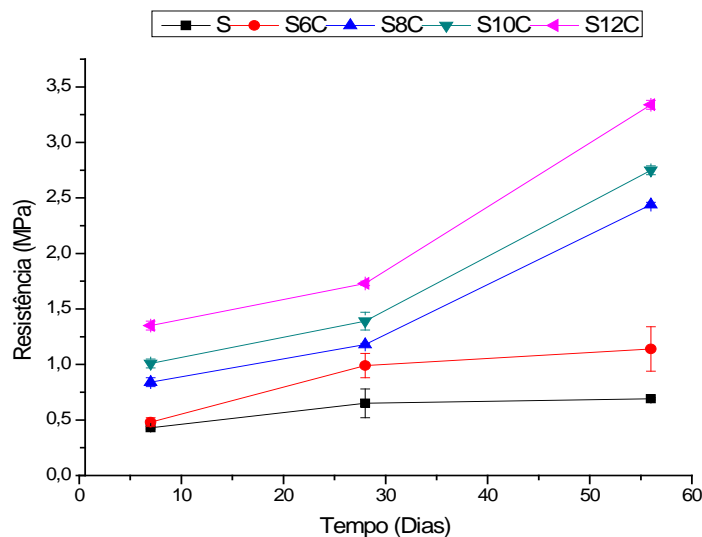
Os ensaios para determinação da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-aglomerante(s) e dos tijolos maciços de solo-cimento e solo-cimento e cal foram realizados conforme as normas NBR 12025/12 e NBR 8492/84. Os resultados obtidos estão representados nas Tabelas 6, 7, 8, e nas Figuras 13, 14, 15, e 16 a seguir.

De modo geral e conforme apresentado na Tabela 6 e na Figura 13, verifica-se que a adição do aglomerante cimento nos percentuais especificados elevaram os valores da resistência à compressão simples das composições estudadas nos corpos-de-prova cilíndricos em relação ao solo. Observa-se que os valores obtidos para os corpos-de-prova cilíndricos S8C, S10C e S12C atingiram aos 56 dias patamares de resistência compatíveis com os parâmetros exigidos pela NBR 12025/12.

Tabela 6 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cal

Composições	Resistência à compressão simples (MPa)			
	07 Dias	28 Dias	56 Dias	300 Dias
S	0,43±0,01	0,65±0,13	0,69±0,01	-
S6C	0,48±0,04	0,99±0,11	1,14±0,20	-
S8C	0,84±0,04	1,18±0,01	2,44±0,02	-
S10C	1,01±0,04	1,39±0,08	2,75±0,04	-
S12C	1,35±0,04	1,73±0,02	3,34±0,04	-
S6CH	0,16±0,10	0,32±0,01	0,50±0,06	1,97±0,03
S8CH	0,23±0,02	0,38±0,04	0,57±0,01	-
S10CH	0,29±0,04	0,39±0,01	0,60±0,05	4,31±0,01
S12CH	0,30±0,06	0,43±0,03	0,70±0,06	-

Figura 13 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento



Os resultados obtidos comprovam a ação dos silicatos de cálcio C2S e C3S, a partir da hidratação dos mesmos, para o aumento da resistência mecânica das composições estudadas ao longo do período de cura, ressaltando-se que a cinética das reações químicas entre os argilominerais do solo e os componentes do aglomerante cimento ocorrem em duas etapas distintas: a primeira que envolve a ação cimentícia imediata dos silicatos e aluminatos presentes no aglomerante e a segunda que está relacionada a ação pozolânica entre os argilominerais do solo e o hidróxido de cálcio formado no decorrer do fenômeno de hidratação do cimento.

Com relação aos valores obtidos para a mistura solo-cal, observa-se na Tabela 6 e na Figura 14 a seguir, que os valores de resistência à compressão simples apresentaram resultados inferiores aos obtidos para o solo nas diversas composições. Tal fato está relacionado ao fator tempo requerido para que ocorram as reações pozolânicas entre os argilominerais do solo e o hidróxido de cálcio hidratado. Segundo Silva et al (2008), as reações pozolânicas para formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados ocorrem a médio e longo prazo e melhoram as propriedades mecânicas da mistura solo-cal, esse fato foi confirmado pelos resultados obtidos em amostras de solo-cal rompido aos 300 dias e encontram-se representados na Figura 15 que segue.

Figura 14 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cal

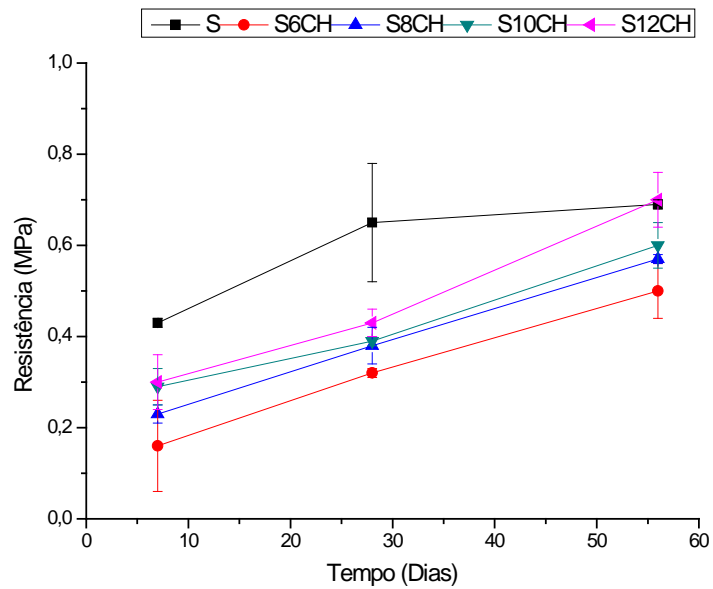
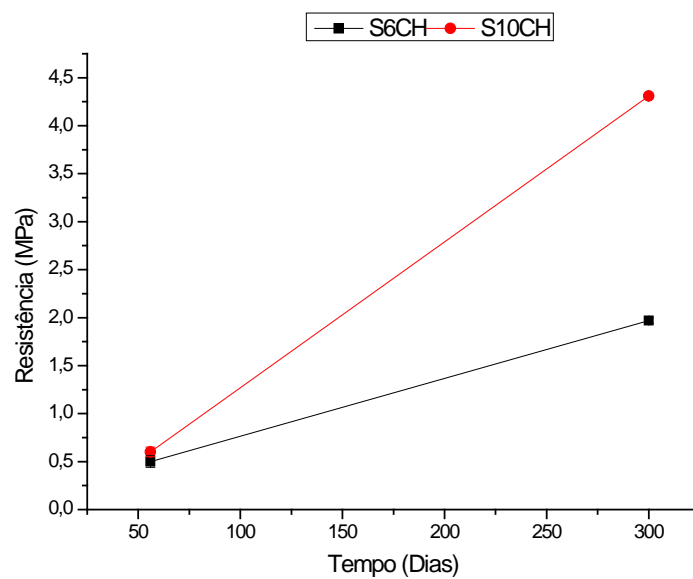


Figura 15 – Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cal aos 300 dias



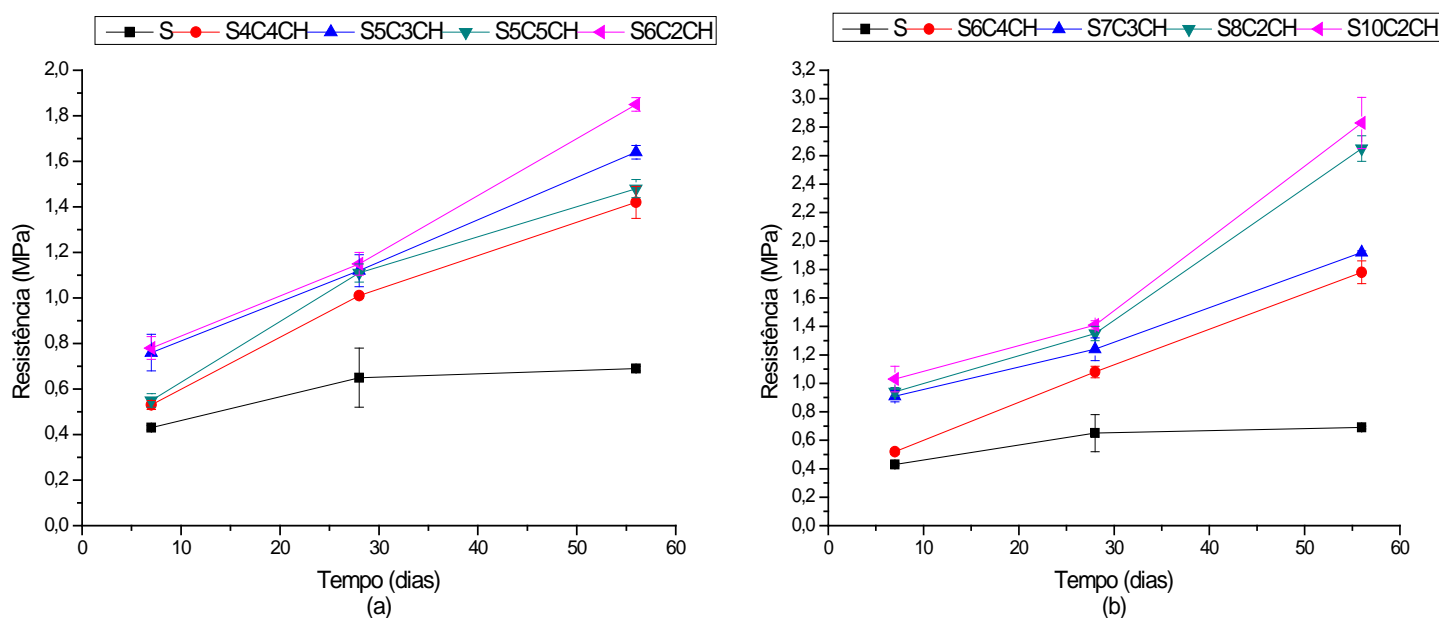
Deve-se ressaltar que os corpos-de-prova cilíndricos moldados sem aglomerantes não foram imersos em água antes da realização do ensaio de resistência a compressão simples como preconiza a NBR 12025/12, uma vez que os mesmos quando colocados em imersão desagregam. Tal fato explica os valores inferiores de resistência à compressão simples das misturas solo-cal em relação ao solo.

De modo geral, quanto às composições solo-cimento e cal, conforme apresentado na Tabela 7 e na Figura 16 (a) e (b), verifica-se que as mesmas não atingiram os limites de resistência à compressão simples estabelecidos pela NBR 12025/12, com exceção das composições S8C2CH e S10C2CH que alcançaram aos 56 dias os parâmetros prescritos pela norma citada.

Tabela 7 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal

Composições	Resistência à compressão Simples (MPa)		
	07 Dias	28 Dias	56 Dias
S4C4CH	0,53±0,02	1,01±0,01	1,42±0,07
S5C3CH	0,76±0,08	1,12±0,07	1,64±0,03
S5C5CH	0,55±0,03	1,11±0,04	1,48±0,04
S6C2CH	0,78±0,05	1,34±0,05	1,85±0,03
S6C4CH	0,52±0,02	1,08±0,04	1,78±0,08
S7C3CH	0,91±0,04	1,24±0,08	1,92±0,01
S8C2CH	0,94±0,03	1,35±0,05	2,65±0,09
S10C2CH	1,03±0,09	1,41±0,03	2,83±0,18

Figura 16 - Resistência dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal (a) e (b)



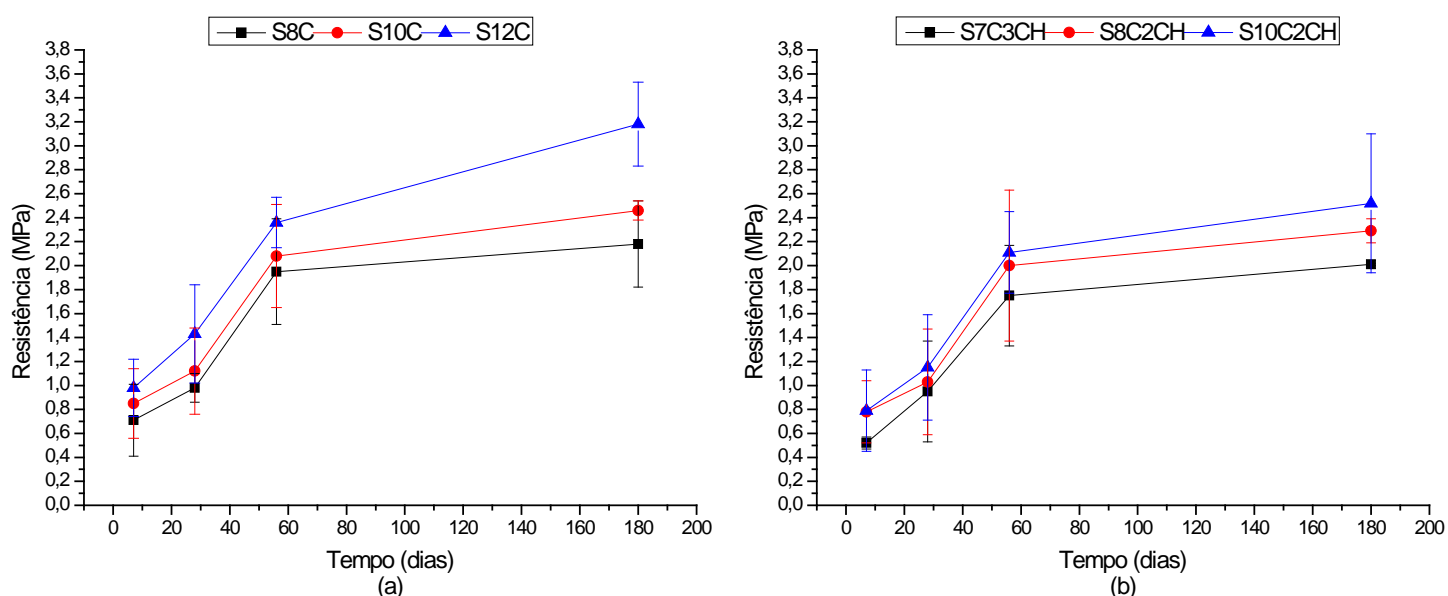
Tal fato está relacionado ao aumento da concentração do hidróxido de cálcio na mistura proveniente da hidratação das fases anidras C2S e C3S presentes no cimento, e ao fenômeno da carbonatação que envolve reações entre o percentual de hidróxido de cálcio incorporado e o dióxido de carbono presente no ar atmosférico e na água da mistura. Segundo Azevedo (2010), a carbonatação é considerada uma reação cujo resultado fragiliza as misturas solo-cal porque retira cátions de cálcio da superfície das composições para gerar reações com o CO₂, formando compostos de menor resistência que os silicatos e aluminatos gerados pela cimentação pozolânica.

Quanto à resistência à compressão simples dos tijolos, com base nos dados obtidos para as composições moldadas, observa-se na Tabela 8 e na Figura 17 (a) e (b) que os valores médios ficaram abaixo dos parâmetros estabelecidos pela NBR 8491/84.

Tabela 8 - Resistência dos tijolos solo-cimento e solo-cimento e cal

Composições	Resistência à compressão Simples (MPa)			
	07 dias	28 dias	56 dias	180 dias
S8C	0,71±0,30	0,98±0,12	1,95±0,44	2,18±0,36
S10C	0,85±0,29	1,12±0,36	2,08±0,43	2,46±0,08
S12C	0,98±0,24	1,43±0,41	2,36±0,21	3,18±0,35
S7C3CH	0,52±0,05	0,95±0,42	1,75±0,42	2,01±0,01
S8C2CH	0,78±0,26	1,03±0,44	2,00±0,63	2,29±0,10
S10C2CH	0,79±0,34	1,15±0,44	2,11±0,34	2,52±0,58

Figura 17 - Resistência dos tijolos solo-cimento e solo-cimento e cal (a) e (b)



Deve-se ressaltar, que Neves (2008) preconiza para tijolos de solo-cimento, sem fins estruturais, a resistência mínima exigida é de 1,0 MPa com base nas recomendações da ABCP.

Observa-se na Tabela 8 e na Figura 17 (a) e (b) que as composições S8C2CH e S10C2CH atingiram aos 56 dias os parâmetros exigidos pela norma 8491/84. Os dados obtidos para os tijolos solo-cimento e solo-cimento e cal rompidos aos 180 dias, atenderam integralmente aos parâmetros estabelecidos pela respectiva norma, ou seja, atingiram valores superiores a 2,0 MPa. Ressalte-se que a composição que obteve o melhor valor de resistência mecânica à compressão simples foi a S10C2CH. Os dados obtidos aos 180 dias comprovam a necessidade de um maior período de tempo para que a reação pozolânica se concretize, elevando a resistência mecânica do tijolo maciço aos patamares exigidos pela norma.

Observa-se que os melhores resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples para os tijolos maciços foram inferiores aos verificados nos corpos-de-prova cilíndricos nas respectivas composições. Essa diferença de valores está associada a variáveis relacionadas aos processos de moldagem, energia de compactação e ao fator humano. Ressalte-se que os procedimentos aplicados em laboratório para moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos não foram possíveis de serem reproduzidos nas mesmas condições quando da prensagem dos tijolos maciços, uma vez que a prensa manual utilizada na pesquisa não atingiu a mesma energia de compactação do ensaio de compactação proctor normal.

4.5 Ensaio de Absorção de água para corpos-de prova cilíndricos e tijolos maciços

Os ensaios para determinação da absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-aglomerante(s) e dos tijolos maciços de solo-cimento e solo-cimento e cal foram realizados conforme as normas NBR 13555/96 e NBR 8492/84. Os resultados obtidos estão representados nas tabelas e figuras a seguir.

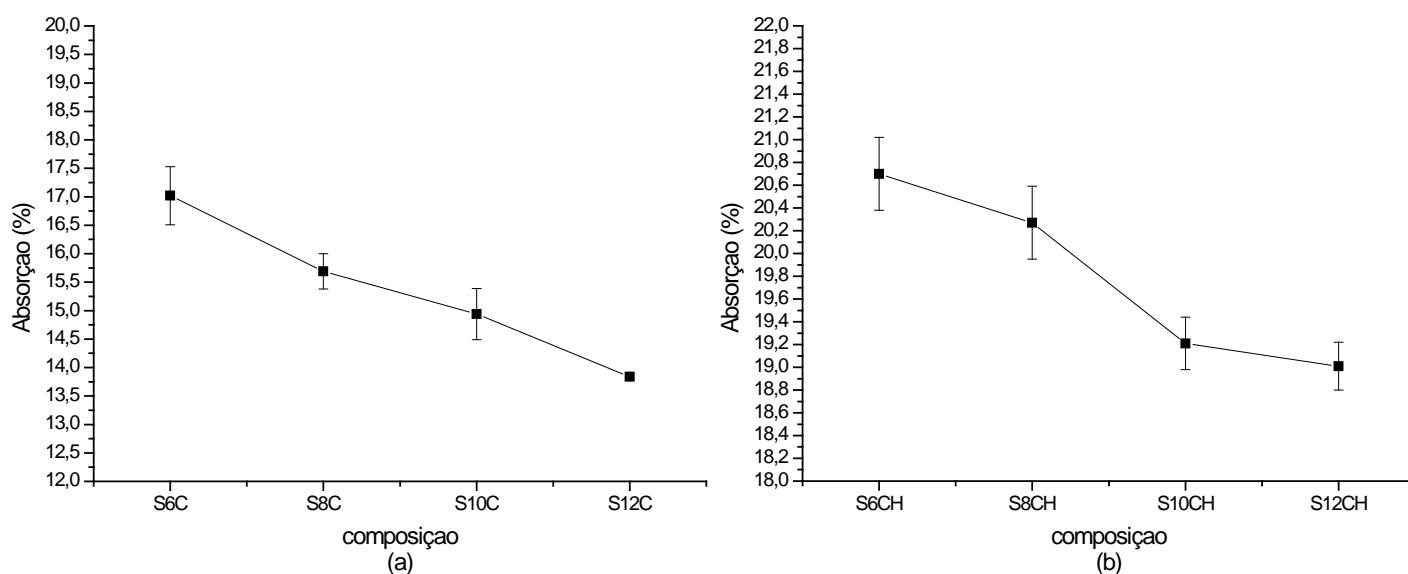
De modo geral e conforme apresentado na Tabela 9 e Figura 18 (a) e (b), verifica-se que as composições solo-cimento e solo-cal moldadas atingiram os limites estabelecidos pela norma NBR 13555/96 quanto à absorção de água, com exceção da

composições S6CH e S8CH.

Tabela 9 - Absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo cal

Composições	Absorção (%)
S6C	17,02±0,51
S8C	15,69±0,31
S10C	14,94±0,45
S12C	13,84±0,05
S6CH	20,70±0,32
S8CH	20,27±0,32
S10CH	19,21±0,23
S12CH	19,01±0,21

Figura 18 - Absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cal (a) e (b)



Deve-se ressaltar que a estabilização química obtida com a incorporação de cimento ao solo nas composições estudadas, em consórcio com a estabilização mecânica do processo de compactação, contribuíram para aceleração dos mecanismos envolvidos na reação cimentícia com os argilominerais do solo, melhorando a densidade das misturas e reduzindo a porosidade das mesmas. Nas composições solo-cal foi aplicada a mesma energia de compactação usada na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de solo-

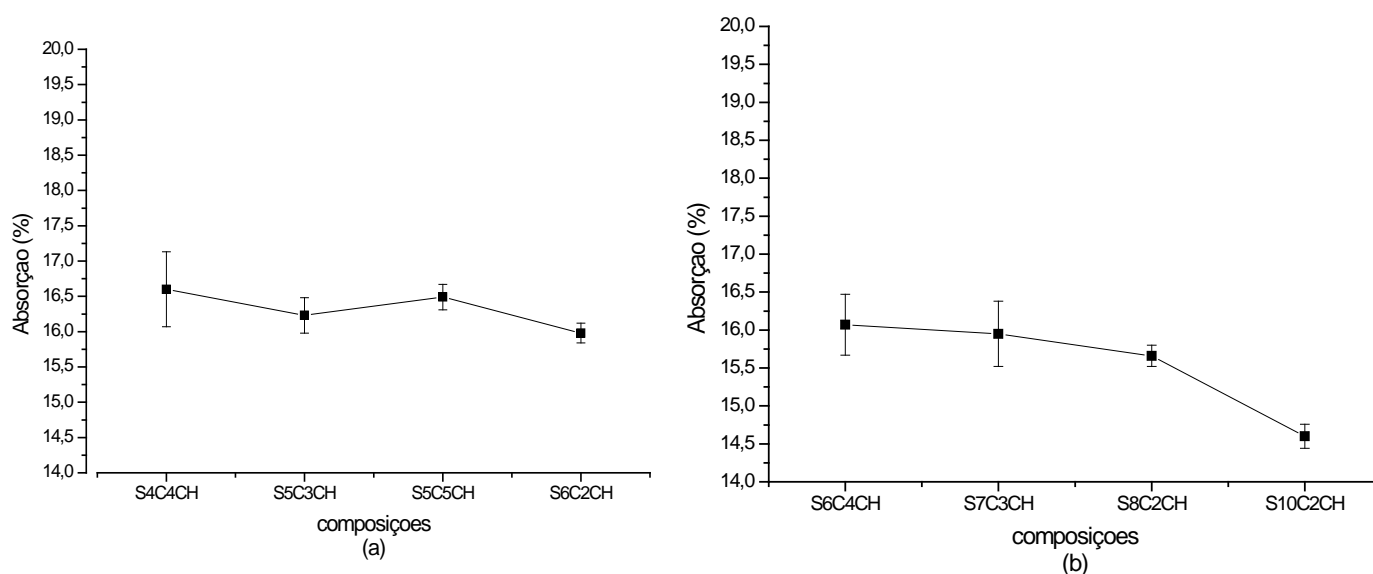
cimento, no entanto a reatividade do hidróxido de cálcio com os argilominerais do solo ocorre mais lentamente, uma vez que as reações pozolânicas envolvidas no processo de estabilização química exigem tempo de cura superior a 56 dias para alcançar valores maiores de cimentação e coesão entre as partículas da mistura, reduzindo assim sua porosidade.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 10 e na Figura 19, verifica-se que as composições solo-cimento e cal atingiram os limites prescritos na NBR 13555/96.

Tabela 10 - Absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal

Composições	Absorção (%)
S4C4CH	16,6±0,53
S5C3CH	16,23±0,25
S5C5CH	16,49±0,18
S6C2CH	15,98±0,14
S6C4CH	16,07±0,40
S7C3CH	15,95±0,43
S8C2CH	15,66±0,14
S10C2CH	14,60±0,16

Figura 19 - Absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal (a) e (b)



Esse fato pode ser justificado pelas reações cimentícia e pozolânica proporcionado

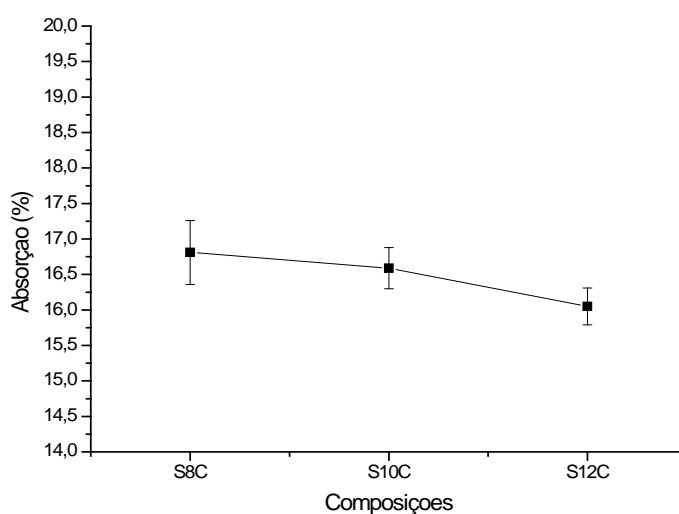
pelos percentuais de hidróxido de cálcio incorporados aos sistemas binário solo-cimento, que contribuiu para uma melhor densificação e redução da porosidade das misturas estudadas. Ressalte-se que o melhor resultado obtido para a absorção de água das diversas combinações solo-cimento e cal foi a S10C2CH.

De modo geral e conforme apresentado na Tabela 11 e Figura 20, verifica-se que as composições solo-cimento aplicadas para produção dos tijolos maciços atingiram os limites estabelecidos pela NBR 8492/84.

Tabela 11 - Absorção de água dos tijolos solo-cimento

Composições	Absorção (%)
S8C	16,81±0,45
S10C	16,59±0,30
S12C	16,05±0,26

Figura 20 – Absorção de água dos tijolos solo-cimento



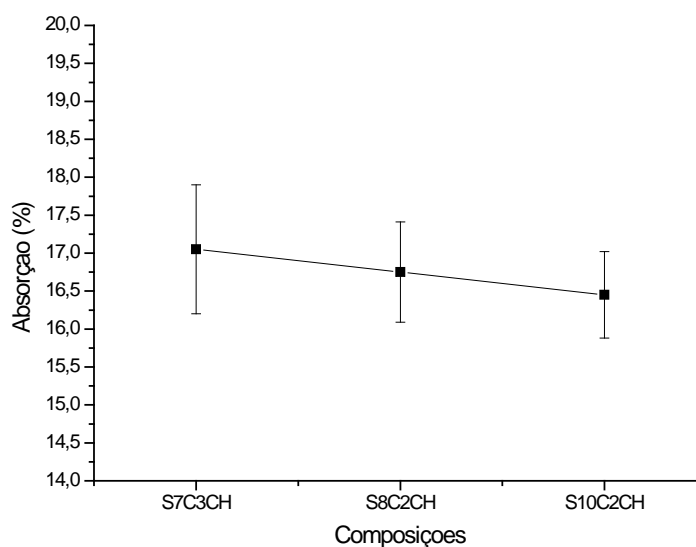
Ressalte-se que os procedimentos de moldagem e a energia de compactação utilizadas na prensagem dos tijolos maciços foram diferentes daquelas aplicadas para confecção dos corpos-de-prova cilíndricos, ocasionando um aumento da porosidade das misturas solo-cimento utilizadas na produção dos tijolos maciços, e contribuindo para elevação dos teores de absorção de água dessas composições.

Conforme apresentado na Tabela 12 e Figura 21, verifica-se que todas as composições solo-cimento e cal moldadas alcançaram os limites estabelecidos pela norma NBR 8492/84, com relação a absorção de água.

Tabela 12 - Absorção de água dos tijolos de solo-cimento e cal

Composições	Absorção (%)
S7C3CH	17,05±0,85
S8C2CH	16,75±0,66
S10C2CH	16,45±0,57

Figura 21 - Absorção de água de tijolos de solo-cimento e cal



A incorporação do hidróxido de cálcio nas composições solo-cimento, proporcionaram uma maior densificação das composições e uma redução nos vazios das mesmas, contribuindo, assim, para redução da porosidade dos tijolos. Os resultados obtidos confirmam a relação existente entre porosidade, absorção de água e resistência mecânica, uma vez que a composição S10C2CH foi a que alcançou o maior valor de resistência mecânica e o menor índice de absorção de água.

4.6 Ensaio de durabilidade modificado

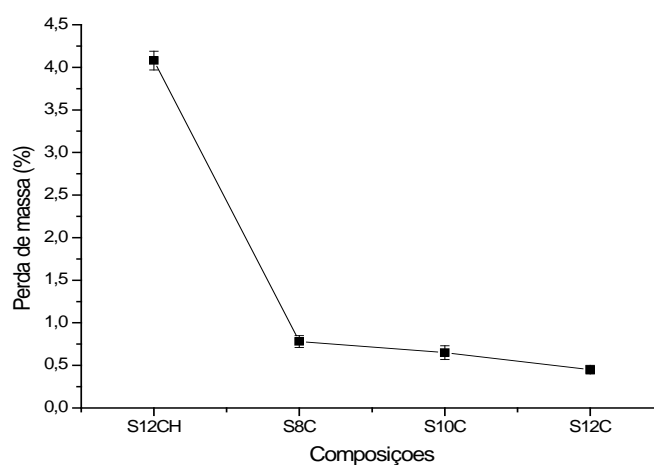
O ensaio de durabilidade modificado foi aplicado nos tijolos maciços adaptando-se os preceitos previstos no método de ensaio DNER-ME 203/94 e os limites estipulados pela NBR 13553/96, conforme tabelas e figuras a seguir.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 13 e na Figura 22 a seguir, verifica-se que as composições solo-cimento utilizadas na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos apresentaram uma perda de massa inferior a obtida na mistura solo-cal (S12CH).

Tabela 13 – Perda de Massa dos corpos-de-prova cilíndricos

Ensaio de durabilidade modificado	
Composições	Perda de massa (%)
S12CH	4,08±0,11
S8C	0,78±0,07
S10C	0,65±0,08
S12C	0,45±0,05

Figura 22 – Perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e solo-cal



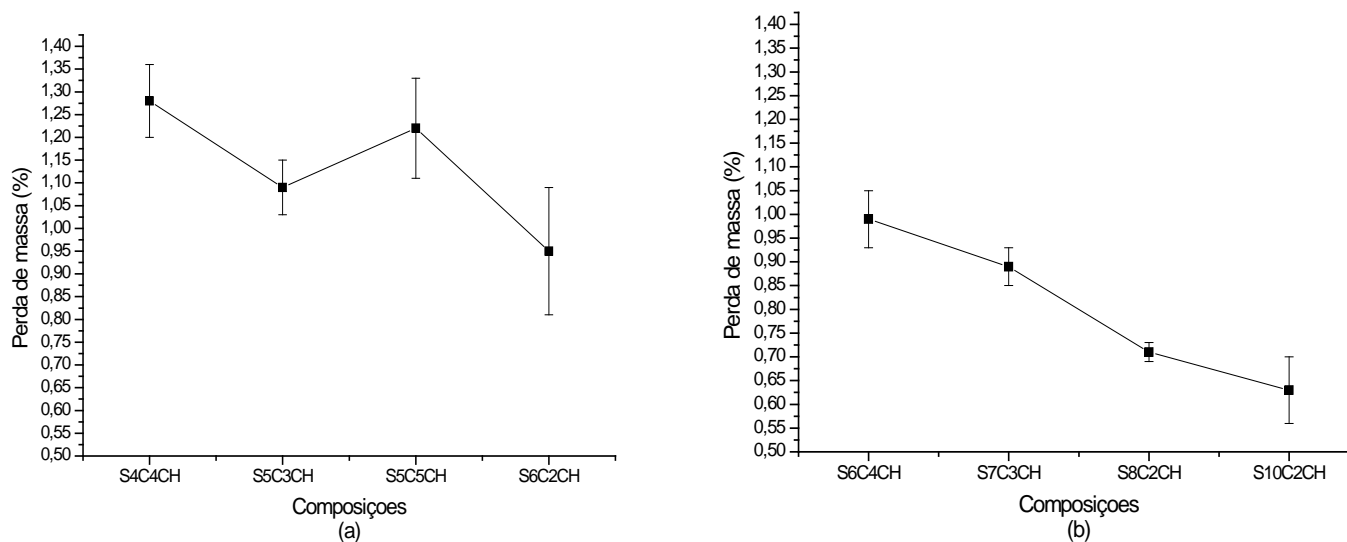
Os resultados obtidos estão relacionados à solubilidade do hidróxido de cálcio, uma vez que o composto solo-cal requer maior tempo de cura para que ocorram as reações pozolânicas com os argilominerais presentes no solo. Ou seja, as misturas solo-cal necessitam de maior tempo para atingir parâmetros de resistência similares as de solo-cimento. Além disso sabe-se que o hidróxido de cálcio, por necessitar de percentuais maiores de água para sua hidratação, proporciona na mistura solo-cal aumento da umidade ótima de prensagem e, conseqüentemente, aumento do índice de vazios quando a água livre evapora no procedimento de secagem, contribuindo para o aumento do percentual de perda de massa da formulação, quando comparada com as misturas de solo-cimento.

Conforme disposto na Tabela 14 e Figura 23 (a) e (b) a seguir, verifica-se que todas as misturas solo-cimento e cal moldadas atingiram os limites estabelecidos pela norma NBR 13553/96 quanto à perda de massa, atendendo a disposição da mesma de que a perda de massa após os ciclos de secagem e molhagem para os solos tipo A-6 não deve ser superior a 7%.

Tabela 14 – Perda de Massa dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal

Ensaio de durabilidade modificado	
Composições	Perda de massa (%)
S4C4CH	1,28±0,08
S5C3CH	1,09±0,06
S5C5CH	1,22±0,11
S6C2CH	0,95±0,15
S6C4CH	0,99±0,07
S7C3CH	0,89±0,04
S8C2CH	0,71±0,02
S10C2CH	0,63±0,07

Figura 23 – Perda de massa dos corpos-de-prova cilíndricos solo-cimento e cal (a) e (b)



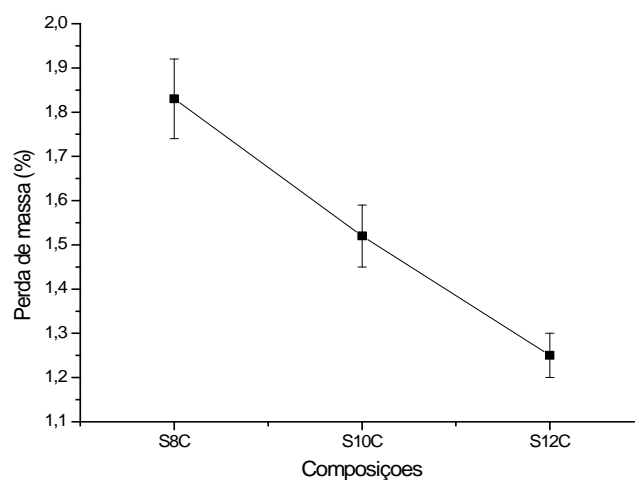
Observa-se nos resultados obtidos que o aumento de teor de cimento nas composições associado a incorporação de hidróxido de cal reduziram a perda de massa das composições estudadas. As combinações ternárias de solo-cimento e cal que obtiveram melhores resultados foram a S8C2CH e S10C2CH.

Conforme apresentado na Tabela 15 e Figura 24 a seguir, verifica-se que as composições aplicadas para produção dos tijolos maciços de solo-cimento apresentaram uma redução na perda de massa a medida que foram adicionados percentuais de cimento na mistura.

Tabela 15 – Perda de Massa dos tijolos maciços solo-cimento

Ensaio de durabilidade modificado	
Composições	Perda de massa (%)
S8C	1,83±0,09
S10C	1,52±0,08
S12C	1,25±0,05

Figura 24 – Perda de massa dos tijolos maciços de solo-cimento



Esse fato é justificado à curto prazo pelas reações cimentícias decorrentes da hidratação do cimento e a longo prazo pelas reações pozolânicas resultantes da reatividade do hidróxido de cálcio produzido no processo de hidratação do cimento com os argilominerais do solo. O resultado dessa interação entre o solo e o aglomerante cimento é o aumento na densificação da mistura e a redução da porosidade da mesma. Observa-se que a formulação que obteve menor perda de massa foi a S12C.

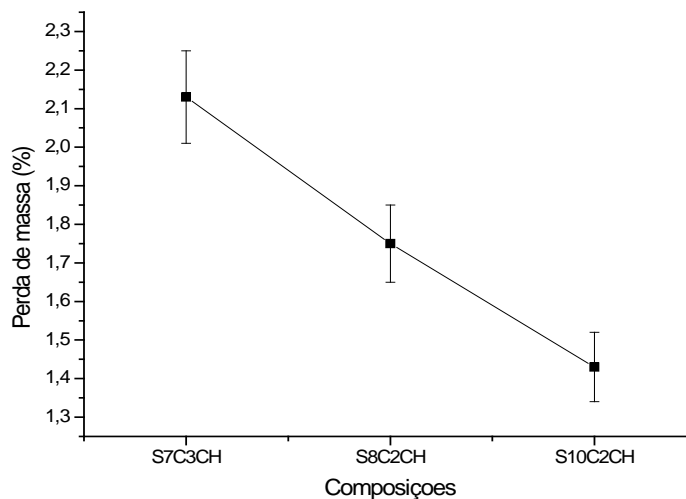
Os resultados obtidos, conforme disposto na Tabela 16 e Figura 25 a seguir evidenciam que todas as misturas solo-cimento e cal moldadas atingiram os limites estabelecidos pela norma NBR 13553/96 quanto a perda de massa.

Tabela 16 – Perda de Massa dos tijolos maciços solo-cimento e cal

Ensaio de durabilidade modificado	
Composições	Perda de massa (%)
S7C3CH	2,13±0,13
S8C2CH	1,75±0,10

S10C2CH	1,43±0,09
---------	-----------

Figura 25 – Perda de massa dos tijolos maciços de solo-cimento e cal



Esses resultados são justificados à curto prazo pelas reações cimentícias provenientes da hidratação dos compostos C_2S e C_3S presentes no Cimento Portland que contribuem para o aumento da resistência e uma maior densificação das composições citadas, conforme o gel de C-S-H cristaliza e ocupa os vazios da mistura. Concomitante ocorrem à longo prazo reações pozolânicas entre o hidróxido de cálcio e os argilominerais do solo, conferindo à composição maior consistência, finalizando assim a estabilização química

A mistura S7C3CH foi a que apresentou o maior percentual de perda de massa quando comparada aos resultados das demais composições. Esse fato está correlacionado com o fenômeno da carbonatação que prejudica as reações pozolânicas entre o hidróxido de cálcio e o solo contribuindo para a elevação da porosidade e redução da densificação dessa formulação. A mistura que obteve o menor percentual de perda de massa foi a S10C2CH, justificando-se o resultado pelo maior percentual de cimento e o menor índice de hidróxido de cálcio incorporado a mistura, uma vez que a cinética das reações químicas cimentantes catalizadas pelo cimento portland são maiores que as reações pozolânicas potencializadas pelo $Ca(OH)_2$.

De modo geral, os resultados apresentados demonstram uma menor perda de massa

dos corpos-de-prova cilíndricos em relação aos tijolos maciços, fato esse que esta relacionado a variáveis relativas aos procedimentos de moldagem, energia de compactação e ao peso específico obtidos na estabilização mecânica das composições, uma vez que os procedimentos adotados no laboratório para moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, especialmente a energia de compactação, não foram reproduzidas integralmente na prensagem dos tijolos maciços.

4.7 Análise química e mineralógica das matérias-primas

Os materiais aplicados na pesquisa foram submetidos a ensaios de caracterização de espectrometria de fluorescência e difração de raios X. Os resultados encontram-se discriminados na Tabela 17 e nas Figuras 26, 27 e 28 a seguir.

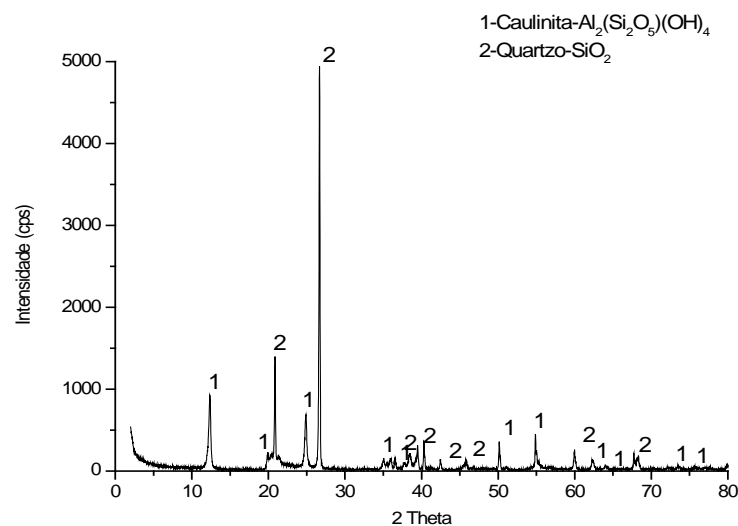
Analisando os resultados obtidos no ensaio de FRX discriminados na Tabela 17 verifica-se que o solo apresenta elevados teores de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), totalizando o valor 88,20% da composição química total, o que indica uma forte presença do mineral quartzo e caulinita conforme comprova o ensaio de DRX representado na figura 26 a seguir.

Tabela 17 – composição química do solo e aglomerantes (FRX)

Óxidos %	Cal Hidratada	Cimento CPIIF-32	Solo
SiO_2	2,31	19,03	52,20
Al_2O_3	0,75	4,60	36,00
Fe_2O_3	0,47	3,22	1,91
MgO	6,43	3,20	0,49
CaO	88,30	60,84	-
K_2O	0,12	1,22	0,25
Na_2O	-	0,15	-
MnO	-	-	-
Mn_2O_3	-	0,18	-
Cr_2O_5	-	0,01	-
CuO	-	-	0,02
SnO_2	0,74	-	-
SrO	0,54	0,19	-
SO_3	0,34	-	0,05
P_2O_5	-	0,16	0,02
TiO_2	-	0,27	0,68

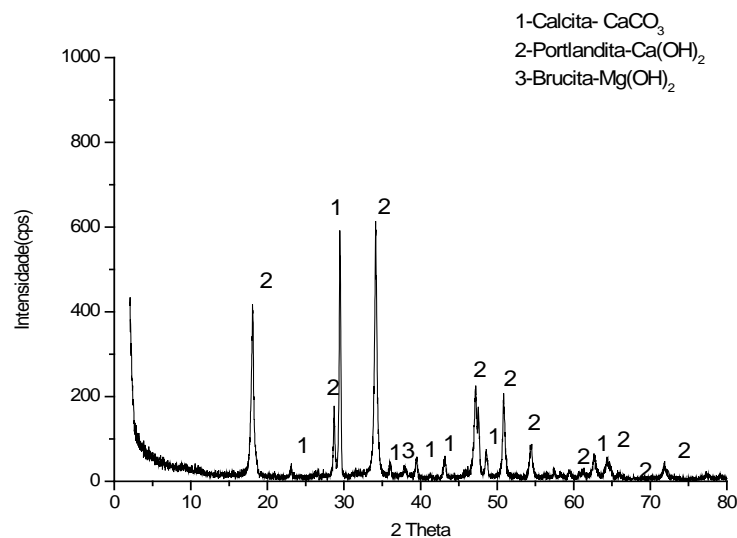
ZnO	-	0,01	-
ZrO ₂	-	-	0,09
V ₂ O ₅	-	-	0,04

Figura 26 – DRX do Solo



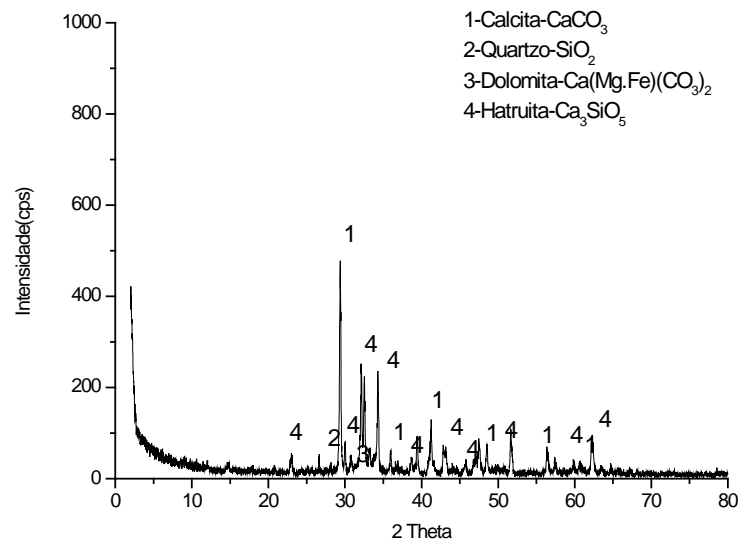
Com relação à amostra da Cal verifica-se um elevado percentual de óxido de cálcio (CaO) da ordem de 88,3% e um valor médio de óxido de magnésio (MgO) da ordem 6,43%, tais índices classificam a cal como cálcica, tipo CH-II, conforme dispõe a NBR 7175/92 e confirma o resultado do ensaio de DRX representado na Figura 27. A presença da fase mineralógica calcita é um indicativo de que, provavelmente, a queima do calcário não foi completa, ou resultante do fenômeno da recarbonatação.

Figura 27 – DRX da Cal



Na amostra do cimento os dados constantes na Tabela 17 indicam um percentual de óxido de cálcio (CaO) da ordem de 60,84%, estando de acordo com a NBR 11578 que regulamenta a produção dos cimentos compostos com adição de filer calcário. Trata-se, portanto, de um cimento composto onde está evidenciada a presença das fases mineralógicas: Calcita, Dolomita, Hatruita (C3S) e Quartzo, conforme comprova o ensaio de DRX do cimento na Figura 28. Ressalte-se que detecção das demais fases presentes é bastante complexa, tendo em vista a baixa intensidade de seus picos que se encontram distribuídos bem próximo do ruído de fundo dos espectros. Além disso, o C2S possui picos em 2θ semelhantes ao do C3S, e distância interplanar $d = 0,278$ nm, enquanto que no C3S $d = 0,279$ nm, causando, assim, a superposição dos espectros das respectivas fases.

Figura 28 – DRX do Cimento



4.8 Análise mineralógica da composição solo-cal aplicada na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos rompidos aos 300 dias.

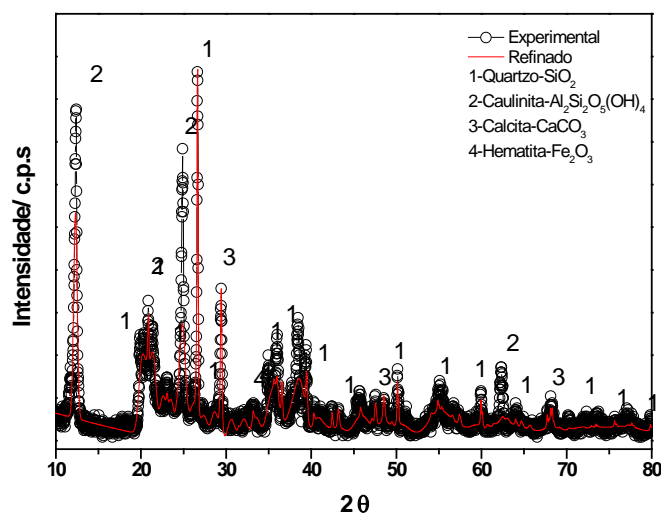
A composição S10CH utilizada na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos e rompida aos 300 dias foi submetida a ensaios de Difração de raios X e refinamento pelo método Rietveld para identificação das fases mineralógicas. Os resultados encontram-se discriminados na Tabela 18 e na Figura 29 a seguir.

Tabela 18 – Quantificação das fases obtidas pelo método Rietveld para solo-cal

Composições	%	%	%	%	σ_f (MPa)
	SiO ₂	CaCO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ Si ₂ O ₃ (OH) ₄	
S10CH	7,29	6,13	0,62	85,95	4,31±0,01

Com relação à amostra da formulação S10CH constata o ensaio de DRX da Figura 29 a presença das fases mineralógicas quartzo, caulinita, calcita e hematita.

Figura 29 – DRX do S10CH



Ressalta-se a ocorrência predominante do quartzo proveniente do solo pesquisado, conforme comprova a sequência de fases representadas no espectro da composição. Quanto às demais fases mineralógicas presentes destacam-se a presença da calcita ao longo do espectro do DRX e a presença mínima da fase hematita.

4.9 Análise mineralógica das composições aplicadas na moldagem dos tijolos maciços rompidos aos 56 dias.

As composições elaboradas e aplicadas na pesquisa foram submetidas a ensaios de Difração de raios X e refinamento pelo método Rietveld para identificação das fases mineralógicas. Os resultados encontram-se discriminados na Tabela 19 e nas Figuras 30, 31 e 32 a seguir.

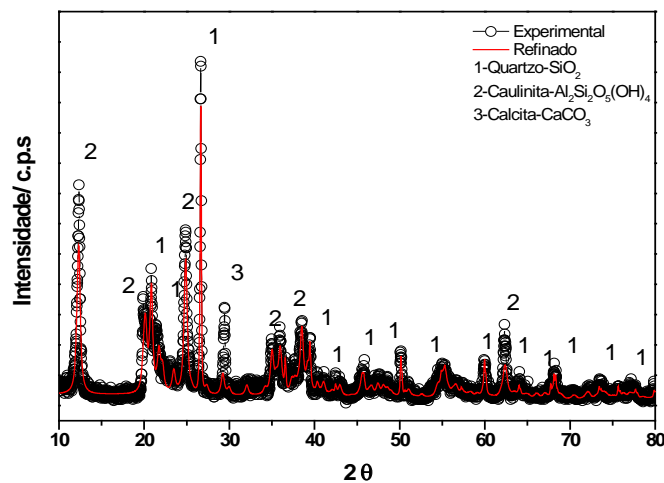
Tabela 19 – Quantificação das fases obtidas pelo método Rietveld para solo-cimento e cal

Composições	% SiO ₂	% CaCO ₃	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ Si ₂ O ₃ (OH) ₄	σ _f (MPa)
-------------	-----------------------	------------------------	-------------------------------------	---	----------------------

S7C3CH	7,43	4,06	-	88,51	1,75±0,42
S8C2CH	7,45	6,00	-	86,54	2,00±0,63
S10C2CH	26,73	5,44	-	67,83	2,11±0,34

Com relação à amostra da formulação S7C3CH constata o ensaio de DRX da Figura 30 a presença das fases mineralógicas quartzo, caulinita e calcita.

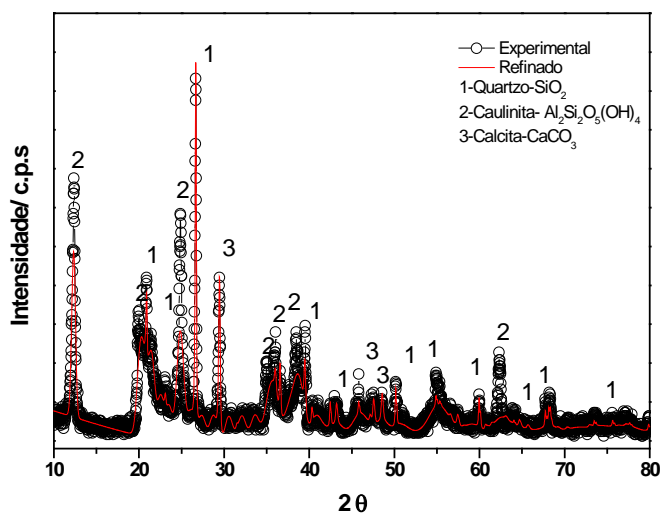
Figura 30 – DRX do S7C3CH



Ressalta-se a ocorrência predominante do quartzo e do argilomineral caulinita provenientes do solo pesquisado, conforme comprova a sequência de fases representadas no espectro da composição. Quanto à fase mineralógica calcita justifica-se sua presença pelo fenômeno da carbonatação decorrente da reação química entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono presente no ar e na água da mistura. Na quantificação das fases dessa amostra pelo método Rietveld confirmou-se em termos percentuais a predominância das fases caulinita e quartzo cuja soma atingiu o valor 95,94% do total da mistura, com um dos picos característicos da Caulinita em 12,41°, e a fase mineralógica quartzo apresenta um pico bem definido e localizado em 26,65°.

Com relação à amostra da formulação S8C2CH constata o ensaio de DRX da Figura 31 a presença das fases mineralógicas quartzo, caulinita e calcita.

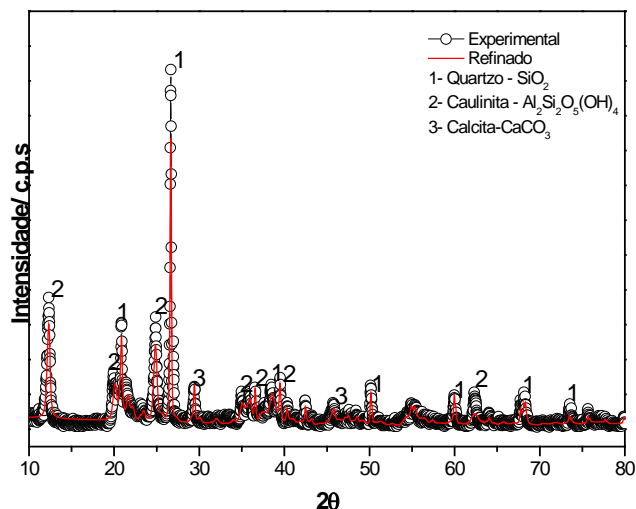
Figura 31 – DRX do S8C2CH



Ressalta-se a ocorrência predominante do quartzo e do argilomineral caulinita provenientes do solo pesquisado, conforme comprova a sequência de fases representadas no espectro da composição. Quanto à fase mineralógica calcita observa-se que a elevação do teor de cimento portland intensificou no espectro do DRX a presença dessa fase mineralógica. Na quantificação das fases dessa amostra pelo método Rietveld confirmou-se em termos percentuais a predominância das fases caulinita e quartzo cuja soma atingiu o valor 94,0% do total da mistura.

Com relação à amostra da formulação S10C2CH confirma o ensaio de DRX da Figura 32 a presença das fases mineralógicas quartzo, caulinita e calcita.

Figura 32 – DRX do S10C2CH



Evidencia-se a ocorrência predominante do quartzo e do argilomineral caulinita provenientes do solo pesquisado, conforme comprova a sequência de fases representadas no espectro da composição. Quanto à fase mineralógica quartzo observa-se na Tabela 19 que à medida que aumenta o percentual de cimento na formulação intensifica-se a presença da fase mineralógica no espectro do DRX. A aplicação do método Rietveld para quantificação de fases da amostra S10C2CH constatou que a soma das fases mineralógicas quartzo e caulinita (94,56%) reduziu seu valor, enquanto a fase quartzo aumentou significativamente sua proporção na composição quando comparados aos percentuais da amostra S7C3CH e S8C2CH.

4.10 Microscopia Eletrônica de Varredura

O Solo utilizado na pesquisa foi submetido ao ensaio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), as imagens encontram-se discriminados nas Figuras 33 e 34 a seguir.

Analisando a micrografia do solo utilizado na pesquisa, representada na Figura 33, e o resultado do EDS no ponto A em destaque na mesma, constatou-se a presença dos elementos químicos Si, Al, O e Fe, conforme comprova o EDS representado na Figura 34 que segue.

Figura 33 - Micrografia do solo obtida por MEV com aumento de 200X.

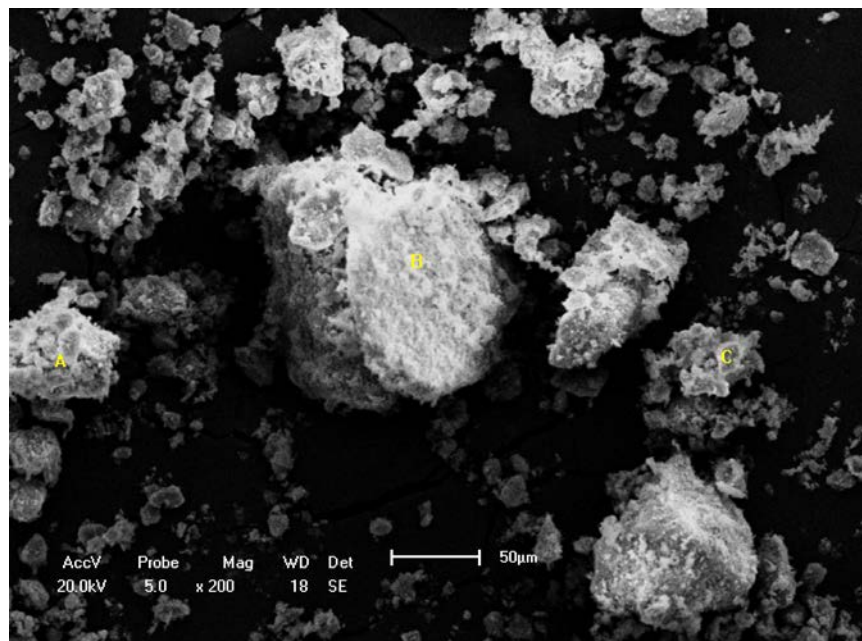
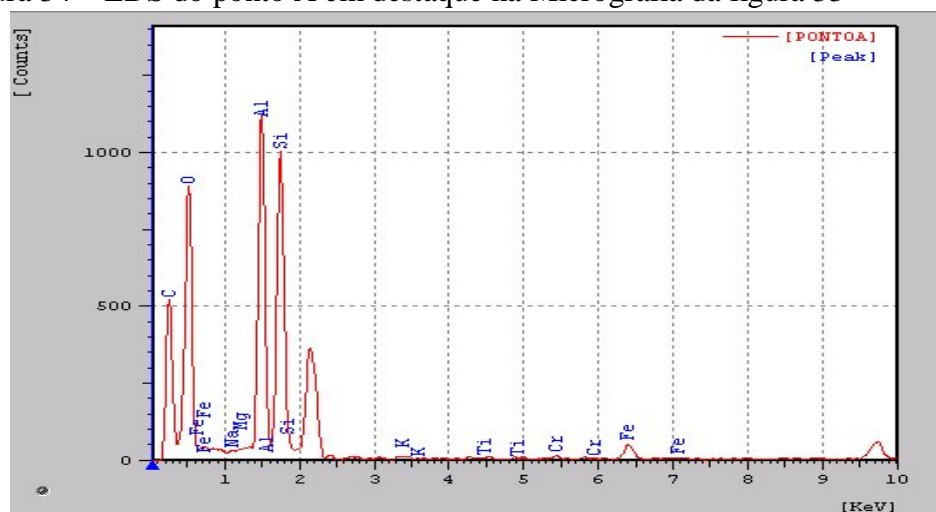


Figura 34 – EDS do ponto A em destaque na Micrografia da figura 33



Tal fato confirma os resultados obtidos nos ensaios de Fluorescência de raios X e Difração de raios X onde predominam o argilomineral Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e o mineral quartzo.

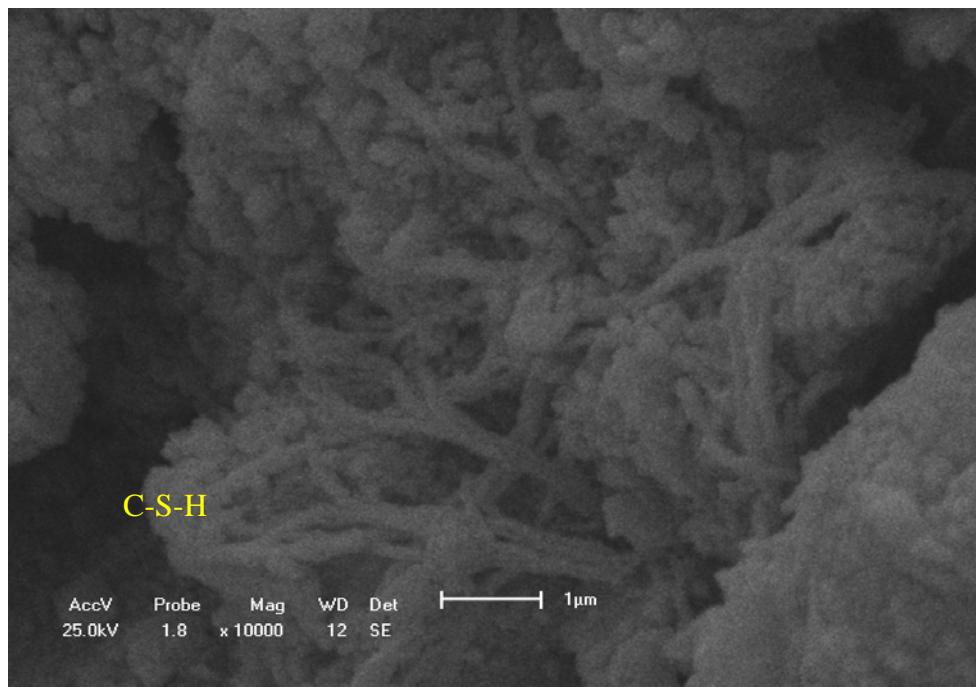
4.10.1 Análise da superfície de fratura

As composições aplicadas na pesquisa e rompidas aos 56 dias foram encaminhadas para realização de Microscopia eletrônica de varredura com o objetivo de análise da

superfície de fratura. Os resultados encontram-se representados nas figuras e gráficos a seguir.

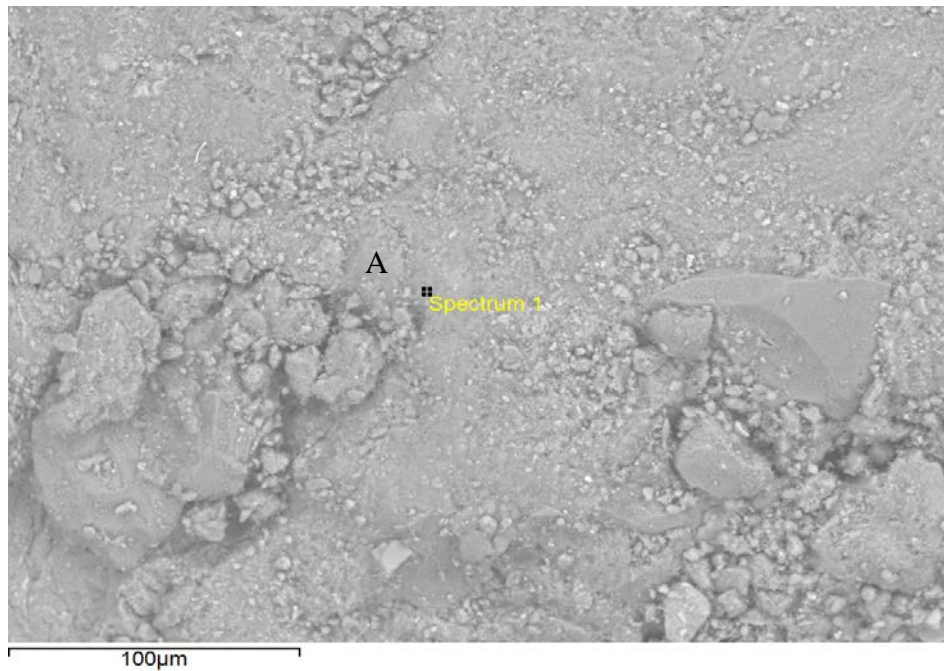
As micrografias da superfície de fratura da amostra de tijolo S7C3CH, representadas nas Figuras 35 e 36 a seguir, constata-se na imagem da Figura 35 a formação fase C-S-H com sua estrutura fibrosa resultante da hidratação da fase C3S, e das reações pozolânicas entre os cristais de Portlandita com sílica presente no solo. Observa-se, também, a estrutura lamelar da caulinita.

Figura 35 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S7C3CH - 10Kx



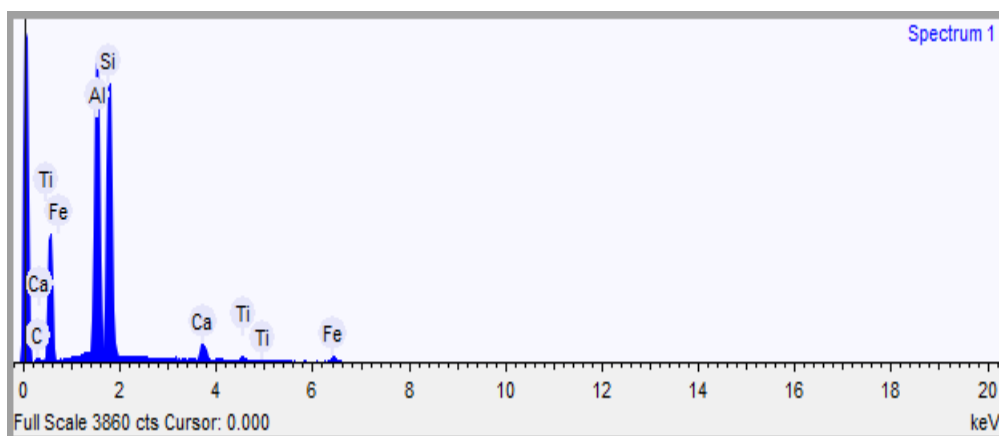
Na micrografia da Figura 36 a seguir verifica-se uma reduzida presença de poros e uma boa homogeneidade na superfície da amostra, resultando em uma boa densidade da composição. No ponto A, da Figura 36, foi realizado o EDS da amostra S7C3CH.

Figura 36 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S7C3CH - 0.5Kx



A Figura 37 a seguir representa o ensaio de EDS realizado na amostra S7C3CH, onde podemos observar a presença predominante dos elementos químicos Si, Al, Ca e Fe. A micrografia ratifica o resultado obtido anteriormente no DRX da respectiva composição.

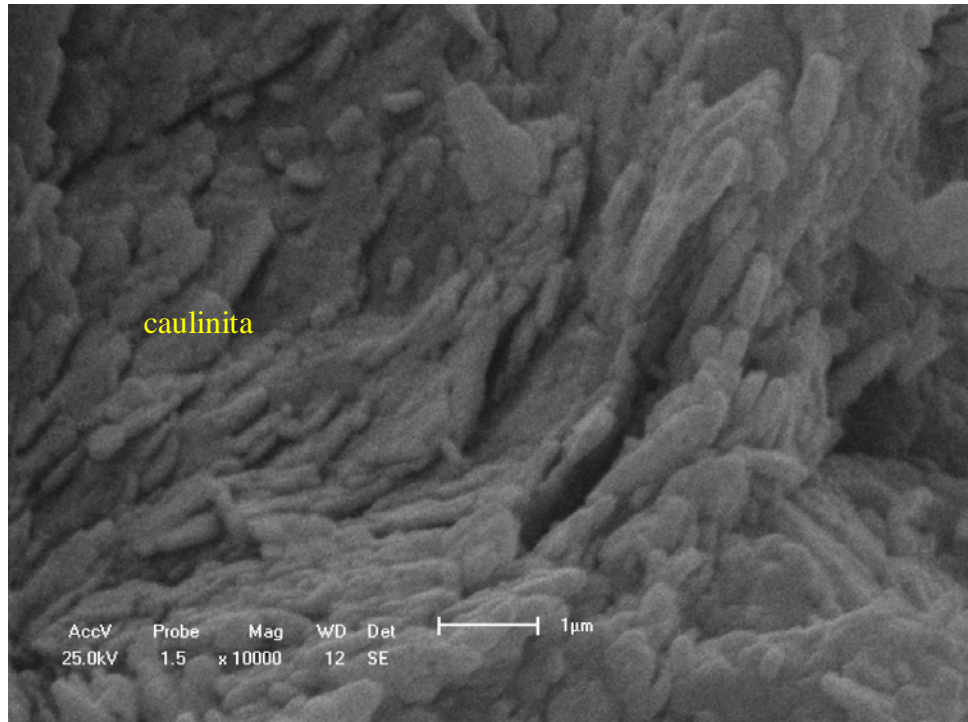
Figura 37 – EDS da área em destaque na Micrografia da figura 36



A micrografia da superfície de fratura da amostra de tijolo S10C2CH, representada nas Figuras 38 e 39 a seguir, constatou a formação da fase C-S-H e a presença da estrutura

lamelar do argilomineral caulinita. Ressalte-se que a composição S10C2CH foi a que apresentou os melhores resultados nos ensaios físicos e mecânicos.

Figura 38 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S10C2CH – 10Kx



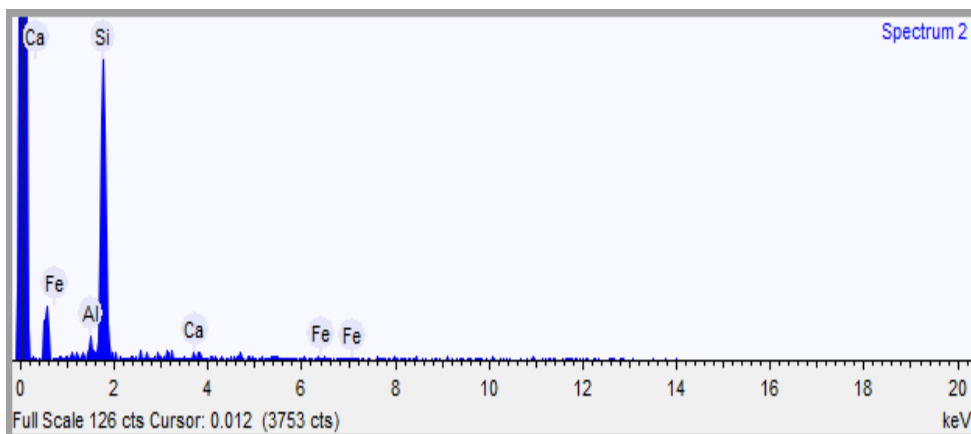
Na micrografia da Figura 39 que segue verifica-se, também, uma reduzida presença de poros e uma melhor homogeneidade na superfície da amostra. A melhor densidade da composição S10C2CH confirma os melhores resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade em relação ao observado na composição S7C3CH. No ponto B da micrografia da figura 39 foi feito EDS da amostra S10C2CH.

Figura 39 - Micrografia da superfície de fratura da amostra S10C2CH –0.5Kx



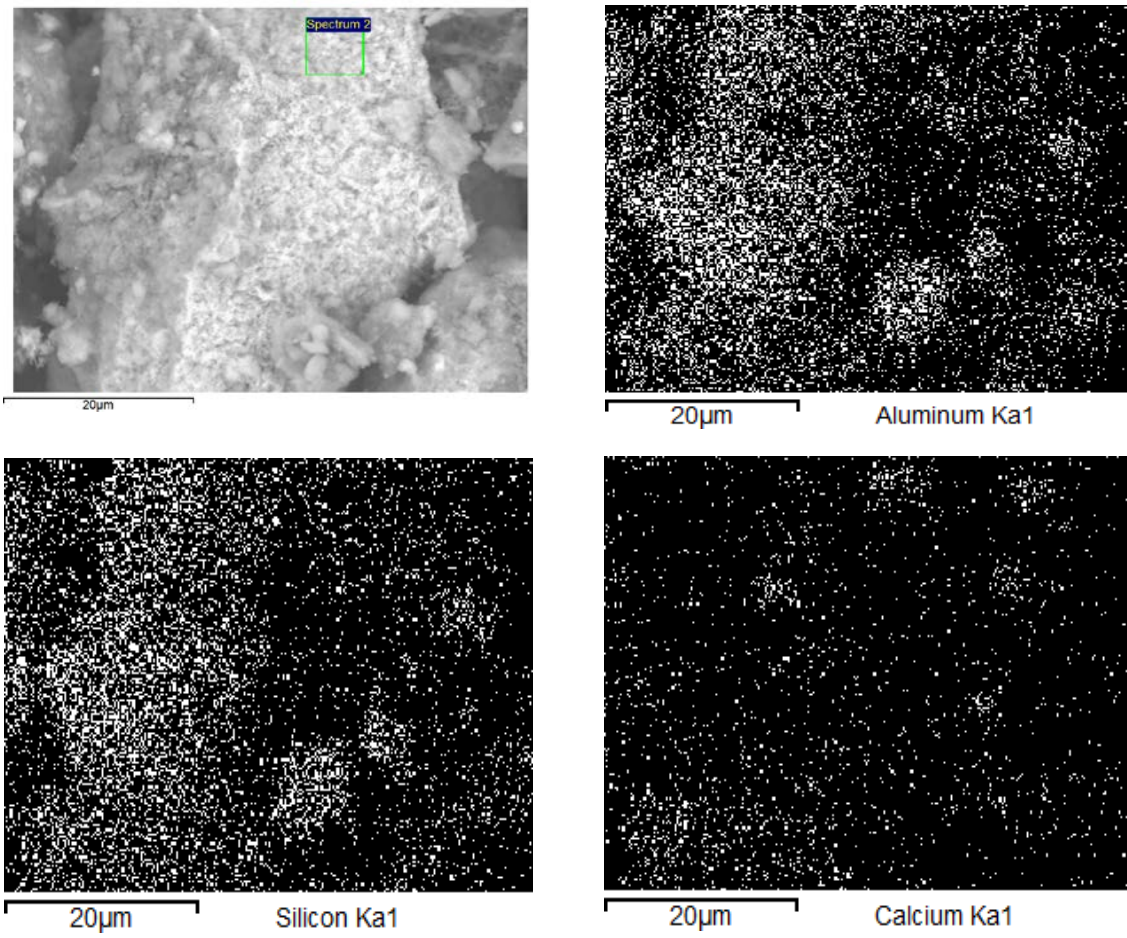
A Figura 40 que segue representa o ensaio de EDS no ponto B da Figura 39 da amostra S10C2CH, onde predomina a presença dos elementos químicos Si, Al, Ca e Fe.

Figura 40 – EDS da Micrografia da figura 39



Na Figura 41 a seguir está representado o mapeamento da concentração dos elementos químicos presentes na formulação S10C2CH, onde ficou constatada uma alta concentração dos elementos químicos Silício e Alumínio, e uma concentração baixa de Cálcio.

Figura 41 – Mapa dos elementos da amostra S10C2CH com destaque para o Cálcio



Na Figura 43 (a), (b), (c) e (d) a seguir está representado o espectro obtido na linha de varredura da Figura 42, onde verificamos a concentração dos elementos químicos Si, Al,

Ca e Fe e uma distribuição de intensidade não uniforme dos espectros dos elementos cálcio e ferro ao longo da linha quando comparados aos espectros do silício e alumínio.

Figura 42 – Micrografia da amostra S10C2CH com destaque para linha de varredura

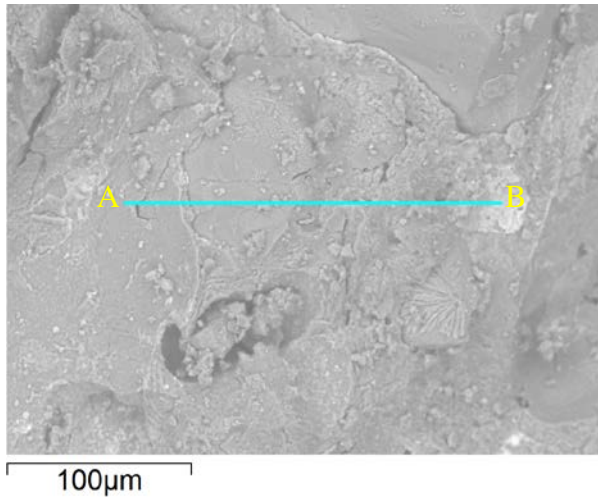
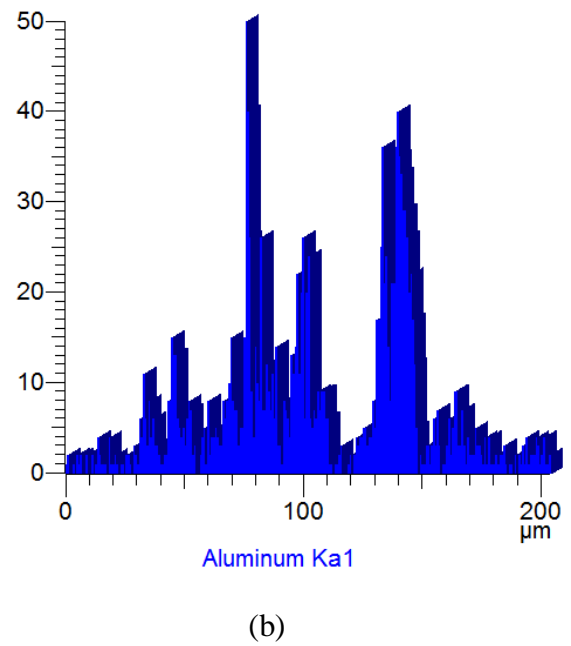
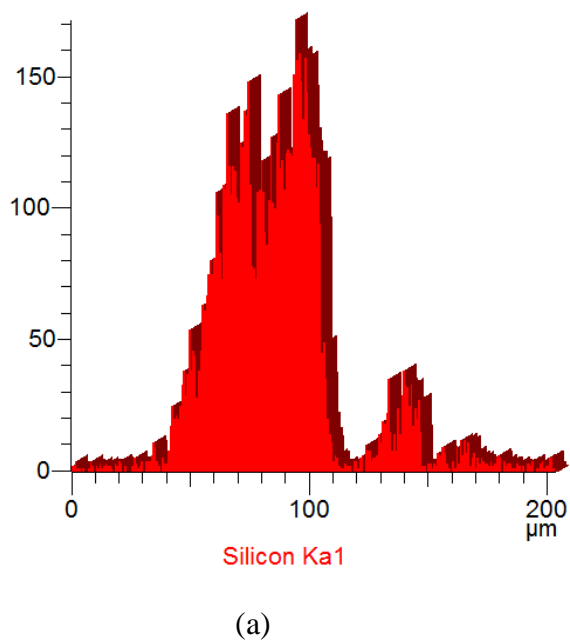
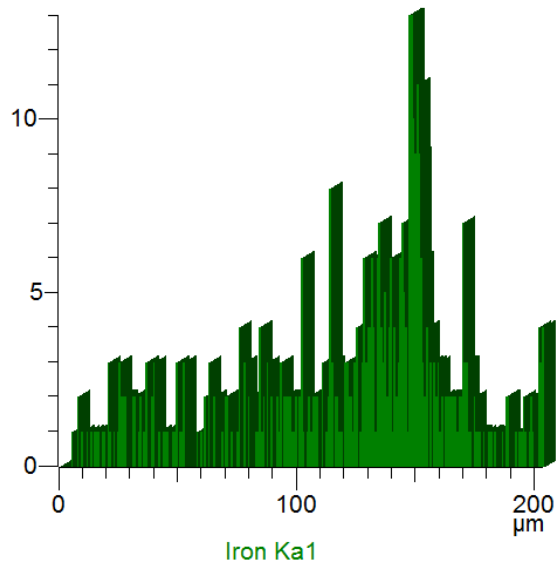
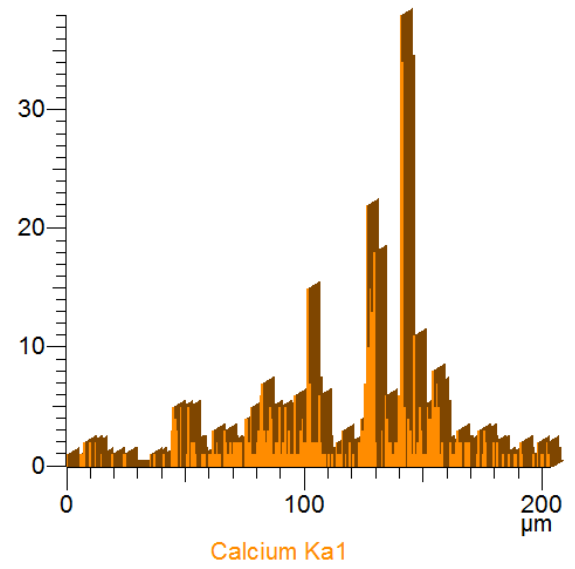


Figura 43 – Espectro obtido na linha de varredura AB da Figura 42





(c)



(d)

4.11 Estudo comparativo do preço unitário para produção do tijolo maciço de solo-cimento e cal em relação ao tijolo cerâmico convencional.

1) Levantamento dos quantitativos para produção do tijolo maciço de solo-cimento e cal na composição S10C2CH:

Para produção de 20 tijolos com as dimensões 5.0 X 10.0 X 21.0 cm utilizou-se os seguintes materiais e insumos:

Solo – 32.0 kg;

Cimento – 10% em relação à massa do solo = 3.20 Kg;

Cal Hidratada – 2% em relação à massa do solo = 0.64 Kg;

Mão-de-obra – R\$ 3.68/hora (dado obtido no SINDUSCON/RN para a profissão de pedreiro);

Estimativa de produção da prensa manual Sahara HOBBY – 100 unidades/hora;

Encargos sociais – 123.93%;

IPI – 5% do custo unitário;

2) Cálculo do custo unitário do tijolo maciço na composição S10C2CH, tendo como base o preço médio do comércio local:

Cimento – R\$ 0.44 Kg;

Cal Hidratada – R\$ 0.37 Kg;

Cimento = $(3.20 \times 0.44)/20 = \text{R\$ } 0.070$

Cal Hidratada = $(0.64 \times 0.37)/20 = \text{R\$ } 0.012$

Soma do custo unitário dos materiais:

$\text{R\$ } 0.070 + 0.012 = \text{R\$ } 0.082$

Mão-de-obra: $(\text{R\$ } 3.68/h)/100 \text{ unidade/hora} = \text{R\$ } 0.0368$

Custo unitário da mão de obra + encargos sociais:

$\text{R\$ } 0.0368 \times 2.2393 = \text{R\$ } 0.082$

Custo unitário dos materiais + mão-de-obra = R\$ 0.164

Custo unitário do tijolo maciço + IPI = $0.164 \times 1.05 = \underline{\text{R\$ } 0.17}$

Levando-se em consideração que o preço unitário médio do tijolo cerâmico convencional disponível no comércio local é de R\$ 0.35, constata-se a viabilidade econômica do tijolo

maciço de solo-cimento e cal (SC102CH) para utilização em alvenaria sem fins estruturais. Ressalte-se que no levantamento do custo unitário do tijolo maciço deve-se ainda acrescentar ao preço final obtido o custo de implantação para fabricação do mesmo, tais como: prensa manual, betoneira, balanças, conjunto de peneiras, energia, água, etc. Observa-se que o local de produção dos tijolos maciços foi considerado como sendo aquele de ocorrência da jazida do solo, ou da obra, não sendo adicionando o custo unitário do mesmo reduzindo-se assim o custo final do tijolo maciço produzido.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.0 CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos com os ensaios físicos e químicos realizados pode-se concluir que:

- 1) A partir dos dados obtidos com os ensaios físicos, mecânicos, químicos, mineralógicos e da microestrutura da superfície de fratura realizados pode-se concluir que a incorporação da cal nos teores de 2 e 3 % nas composições de solo-cimento com percentuais de 7, 8 e 10 % de cimento confirmaram a viabilidade técnica da cal no processo de melhoria das propriedades físicas e mecânicas das composições elaboradas para a produção dos tijolos maciços, atendendo as disposições das normas técnicas vigentes para uso em alvenaria sem fins estruturais.
- 2) Os resultados físicos alcançados nos corpos-de-prova cilíndricos com relação à adição do aglomerante cal ao solo demonstraram a necessidade de um tempo de cura superior a 56 dias, tendo em vista que as reações pozolânicas ocorrem de forma mais lenta quando comparado ao sistema solo-cimento.
- 3) A formulação S10C2CH mostrou uma melhor relação de custo quando comparado ao do tijolo cerâmico convencional.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar a mesma metodologia deste trabalho para novas composições de Solo, cimento e cal;
- Estudar a incorporação da cal ao solo para a produção de tijolos maciços solo-cal;
- Estudar a incorporação da cal em conjunto com resíduo cerâmico ao solo para produção de tijolos maciços;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acchar, W., Materiais cerâmicos: Caracterização e Aplicações, Editora da UFRN, EDUFRN, Natal, RN, 2006.

Akasaki, J. L., O tijolo cru, como elemento construtivo de baixo impacto ambiental, Tese de doutorado em estruturas ambientais urbanas, Faculdade de arquitetura e urbanismo, USP, São Paulo, SP, 2001.

Anjos, M. A. S. et al., Compósitos à base de cimento, reforçados com polpa celulósica de bambu: determinação do teor de reforço ótimo, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5732: Cimento Portland Comum, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6457: Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaio de caracterização, Rio de Janeiro, RJ, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6508: Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7175: Cal hidratada para argamassas, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, RJ, 1988.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7181: Solo – análise granulométrica, Rio de Janeiro, RJ, 1988.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7182: Solo – ensaio normal de compactação, Rio de Janeiro, RJ, 1988.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento – Especificação, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8492: Solo – Cimento – tijolos maciços de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10832: Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com utilização de prensa manual, Rio de Janeiro, RJ, 1989.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11578: Cimento Portland Composto, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12023: Solo-cimento – ensaio de compactação, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12024: Solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12025: Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13553: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13555: Solo-cimento – determinação da absorção de água, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com utilização de prensas manuais, São Paulo, ABCP, boletim técnico BT – 111, 1985.

ABPC – Associação Brasileira dos produtores de Cal. Programa setorial da qualidade da cal hidratada para a construção civil, São Paulo, ABPC, relatório setorial n° 58, 2010.

Azevedo, Andre Luis C., Estabilização de solos com adição de cal: Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG, 2010.

Barbosa, N. P. et al., Construção com terra crua, I Seminário ibero americano de construção com terra, Salvador, BA, 2002.

Behak, L., Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal, Dissertação de mestrado, Universidade federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, RS, 2007.

Bouth, J. A. C. – Produção de tijolos a base de adobe: Uma alternativa para a construção civil, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, RN, 2005.

Brindley, G.W., Kaolin, serpentine and kindred minerals em “The X-ray identification and crystal structure of clays minerals”, Mineralogical Society, Londres, Inglaterra, 1961.

Cabala, G. V. E. Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, 2007.

Carvalho, J. B. Q. Fundamentos da mecânica dos solos, Editora Marconi, 2ª edição, Campina Grande, PB, 2004.

Carvalho Jr. A. N.; Silva A. P.; França E. P., Estudo Comparativo entre Argamassas de Cimento e Argamassas Mistas de Cimento e Cal para Uso em Emboco, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIAS DE ARGAMASSAS, Goiânia, GO, 1995.

Casagrande, A., Classification and identification of soil, American Society of Civil Engineers, 1948.

Caputo, H.P., Mecânica dos solos e suas aplicações, vol.1, Editora LTC, 6ª edição, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

CEPED – Centro de pesquisa e desenvolvimento, Manual de construção com solo-cimento, Camaçari, CEPED, 1984.

Corrêa, M. M. et al, Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos de ambiente tabuleiros costeiros, Amazônia e Recôncavo baiano, revista brasileira de ciência do solo, vol.32, n° 5, Viçosa, MG, 2008.

Costa, O. P., Avaliação de expansão, contração e resistência à compressão simples de barreiras selantes produzidas com solo laterítico estabilizado quimicamente, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, UNESP, SP, 2005.

Departamento Nacional de Estradas e rodagem. DNER ME 203 – 94, Solo-cimento: determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem.

Duart, M. A., Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, RS, 2008.

Figueiredo, S.S, Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de

demolição da construção civil, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, PB, 2011.

Grande, F.M., Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica, Dissertação de Mestrado, Escola de engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 2003.

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

Gusmão Filho, J. A., Solos – da formação geológica ao uso na engenharia, Editora Universitária, UFPE, 2ª edição, Recife, 2008.

HRB – Report of committee on classification of materials for subgrades and granular type Road, Proceedings, Highway Research Board, vol. 25, 1945.

Lea, F. M. , The chemistry of cement and concrete, Editora Edward Arnold, 3ª edição, 1970.

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.

Lima, T. V., Estudo da produção de blocos de solo-cimento com matérias-primas do núcleo urbano da Cidade de Campos dos Goytacazes – RJ, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, RJ, 2006.

Lopes Junior, L. S., Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2007.

Lovato, R. S., Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal aplicado à pavimentação, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

Marangon, A. A. S., Compósitos de PVA/Caulinita e PVA/Caulinita funcionalizada, Dissertação de mestrado, Universidade do Paraná, Curitiba, 2008.

Mercado, M. C., Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, SP, 1990.

Metha, P. K. et al., Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais, Pini, São Paulo, SP, 2008.

Neves, C. M.M., Desempenho de paredes: Procedimento adotado para paredes monolíticas de solo-cimento, CEPED, Camaçari, BA, 2008.

Nogami, J. S. et al., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos, Vilibor, São Paulo, SP, 1995.

Patrício, S. M. R., Aproveitamento de resíduos da construção civil na produção de tijolos solo-cal, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, PB, 2011.

Pinto, C. S., Curso básico de mecânicas dos solos, Editora Oficina de textos, 3ª edição, São Paulo, 2008.

Quarcioni, V. A., Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta, Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, 2008.

Rogers, J. W. J. et al., Durabilidad de um suelo contaminado y tratado com cemento Portland, *Ingenieria de Construcción*, Vol. 23, nº3, 2008, Disponível em www.scielo.cl/pdf/ric/v23n3/art04.pdf.

Santos, J. C. P., Viabilidade Técnica da Produção de Blocos Sílico-Calcários, na Região de Santa Maria no Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

Santos, Pêrsio de Souza. , Ciência e tecnologia de argilas, 2ª Ed, Edgard Blucher Ltda, Vol.1, São Paulo, SP, 1989.

Segantini, A. A. S., Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira (SP), Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2000.

Segantinni, A.A. et al., Solo-cimento e Solo-cal, Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais, IBRACON, São Paulo, SP, 2007.

Sherwood, P. T., Soil Stabilization with cement and lime: State of the Art Review. HMSO, London, 1993.

Silva, E. P. et al., Avaliação de painéis de tijolos prensados de solo-cimento incorporados com resíduos de calçados (EVA), *Revista eletrônica de materiais e processos*, v.3.2, 2008, 44-49, Disponível em www.dema.ufcg.edu.br/revista.

Silva, S. R., Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2005.

Vargas, M., Introdução à Mecânica dos solos, Macgraw-Hill, São Paulo, SP, 1977.