



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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E**  
**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**TESE DE DOUTORADO**

**ESTUDO DA ADIÇÃO CONJUNTA DA CINZA DO BAGAÇO DA**  
**CANA-DE-AÇÚCAR E DO RESÍDUO CERÂMICO NA PRODUÇÃO DE**  
**TIJOLOS MACIÇOS DE SOLO-AGLOMERANTE (S).**

João Batista Duarte

Natal – RN  
Agosto/2020

**JOÃO BATISTA DUARTE**

**ESTUDO DA ADIÇÃO CONJUNTA DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-  
DE-AÇÚCAR E DO RESÍDUO CERÂMICO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS  
MACIÇOS DE SOLO-AGLOMERANTE (S).**

Tese 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 Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar

Natal-RN  
Agosto/2020

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

Duarte, Joao Batista.

Estudo da adição conjunta da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e do resíduo cerâmico na produção de tijolos maciços de solo-aglomerante(s) / Joao Batista Duarte. - 2020.

128 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Natal, 2020.

Orientador: Dr. Wilson Acchar.

1. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar - Tese. 2. Resíduo cerâmico - Tese. 3. Atividade pozolânica - Tese. 4. Tijolos maciços - Tese. I. Acchar, Dr. Wilson. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 691.421

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS-PPGCEM**

ATA Nº 243/2020 DE REALIZAÇÃO DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO DO ALUNO **JOÃO BATISTA DUARTE** DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.

Aos vinte dias do mês de agosto de dois mil e vinte, às nove horas, em sala virtual realizada na plataforma “google meet”, realizou-se a Defesa de Tese de Doutorado intitulada “ESTUDO DA ADIÇÃO CONJUNTA DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR E DO RESÍDUO CERÂMICO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS DE SOLO-AGLOMERANTE (S)”, do Doutorando João Batista Duarte, do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), tendo como Orientador o Prof. Dr. Wilson Acchar. A Banca Examinadora foi composta por: Wilson Acchar (Orientador e Presidente da Banca) – UFRN; Olavo Francisco dos Santos Júnior (Examinador Externo ao Programa) – UFRN; Vamberto Monteiro da Silva (Examinador Externo à Instituição) – IFPB; Sheyla Karolina Justino Marques (Examinadora Externa à Instituição) – IFAL; e Priscylla Cinthya Alves Gondin (Examinadora Externa à Instituição) – IFRN. Inicialmente, o Orientador expôs aos presentes o roteiro formal da Defesa de Tese de Doutorado e, em seguida, deu início aos trabalhos da Banca, passando a palavra ao Candidato para que desse início a apresentação de seu trabalho, marcando o tempo médio de cinquenta minutos para a devida explanação. Concluída a exposição do Candidato, o Presidente passou a palavra aos Examinadores, que deram início ao exame oral. Terminada a arguição oral, solicitou aos presentes e ao Doutorando que se retirassem da sala virtual para que a Banca proferisse o julgamento. Posteriormente, solicitou o retorno do Candidato e, em seguida, foi comunicado que o aluno João Batista Duarte foi aprovado na Defesa de Tese de Doutorado de acordo com as normas vigentes na UFRN. A versão final do trabalho deverá ser submetida, via SIGAA,

para fins de homologação, no prazo de 90 dias, contendo as modificações sugeridas pela Banca Examinadora. Conforme o artigo 46 da Resolução nº 197/2013 - CONSEPE, o Candidato não terá o título se não cumprir as exigências acima. Nada mais tendo sido tratado, a Ata da Sessão Pública de Defesa de Tese de Doutorado foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Candidato ao título.

---

**Prof. Dr. Wilson Acchar**

*Orientador e Presidente da Banca*

---

**Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior**

*Examinador Externo ao Programa*

---

**Prof. Dr. Vamberto Monteiro da Silva**

*Examinador Externo à Instituição*

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sheyla Karolina Justino Marques**

*Examinadora Externa à Instituição*

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Priscylla Cinthya Alves Gondin**

*Examinadora Externa à Instituição*

---

**João Batista Duarte**

*Candidato*

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
SISTEMA INTEGRADO DE PATRIMÔNIO, ADMINISTRAÇÃO E  
CONTRATOS**

**FOLHA DE ASSINATURAS**

*Emitido em 20/08/2020*

**ATA DE DEFESA DE TESE Nº 60/2020 - PPGCEM/CCET (12.10)  
(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

***(Assinado digitalmente em 20/08/2020 17:04 )***

**OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JUNIOR**  
*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
CIV/CT (14.17)  
Matrícula: 1149451*

***(Assinado digitalmente em 20/08/2020 12:05 )***

**WILSON ACCHAR**  
*COORDENADOR DE CURSO – TITULAR PPGCEM/CCET (12.10)  
Matrícula: 1149564*

***(Assinado digitalmente em 21/08/2020 11:51 )***

**JOAO BATISTA DUARTE**  
*DISCENTE  
Matrícula: 20161034805*

***(Assinado digitalmente em 21/08/2020 12:37 )***

**SHEYLA KAROLINA JUSTINO MARQUES**  
*ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 046.997.744-23*

***(Assinado digitalmente em 21/08/2020 08:14 )***

**VAMBERTO MONTEIRO DA SILVA**  
*ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 674.568.634-15*

***(Assinado digitalmente em 20/08/2020 11:57 )***

**PRISCYLLA CINTHYA ALVES GONDIM**  
*ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 034.024.404-66*

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrn.br/documentos/> informando seu número: **60**, ano: **2020**, tipo: **ATA DE DEFESA DE TESE**, data de emissão: **20/08/2020** e o código de verificação: **0c91b2faa3**

Aos meus pais,  
e a minha família, especialmente esposa e filhos,  
pelo apoio e compreensão.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, professor Wilson Acchar pelas orientações passadas durante as etapas dessa pesquisa científica.

Especial, ao professor Vamberto Monteiro, pelos ensinamentos passados durante a pesquisa e pela colaboração em todos os trabalhos realizados.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Aos colegas Ricardo, Jhéssica, Jônatas, Ana Lígia e Rayanderson, parceiros na realização desse trabalho científico.

Ao colega Luciano Góis, pelo incentivo no início de tudo, ainda no mestrado.

Ao professor Fagner, e aos professores Olavo, Jaquelígia e Osvaldo, pelos incentivos passados.

A todos do Laboratório de Mecânica dos Solos, técnico, bolsistas, alunos e professores.

Ao técnico do laboratório de Materiais de Construções da UFRN, Sandro.

Aos colegas do LAPFIMC, pelo incentivo e ajuda na conclusão deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para a elaboração deste trabalho.

A Deus, o criador de todas as coisas.

A minha família, em especial a minha esposa Rita e aos meus filhos João Henrique e João Vitor, por acreditarem e incentivarem em todas as etapas dessa atividade acadêmica.

A todos os anônimos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse concluído.

A CAPES.

Saber não é o suficiente, devemos aplicar.  
“Querer não é o suficiente, devemos fazer”.  
(Johann Wolfgang Von Goethe)

## RESUMO

As indústrias da construção civil e do agronegócio estão sob enorme pressão advinda do aperfeiçoamento da legislação ambiental, visando à elaboração de processos e produtos que necessitem na sua fabricação de menor quantidade de energia e que possam ao final do seu ciclo de vida ser reaproveitados. No agronegócio brasileiro a cana-de-açúcar é um produto agrícola com os menores custos de produção no mundo. A calcinação do bagaço da cana gera a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) que é um passivo ambiental que pode contaminar o solo e o lençol freático. Essa realidade, concernente a geração de volumes expressivos de resíduos, repete-se na cadeia produtiva da construção civil, destacando-se as perdas advindas da quebra de tijolos cerâmicos, nos processos de transporte, armazenamento e uso para edificação de alvenarias sem fins estruturais. O resíduo cerâmico (RC), oriundo da quebra do tijolo cerâmico, quando cominuído aumentará a superfície específica das suas partículas e possibilitará maior reatividade. Logo, o emprego da CBC e do RC no processo de fabricação de tijolos maciços de solo-aglomerante(s) é viável tecnicamente devido à possibilidade de ocorrência da atividade pozolânica, ou seja, a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, decorrente da recombinação da sílica e alumina desorganizadas existentes nos mesmos e no solo laterítico com a fase Portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formada a partir da hidratação do cimento e da constituição química da cal hidratada. Esse estudo científico realizou a caracterização física, mineralógica e química do solo, cal, cimento, CBC e RC. Depois foram moldados tijolos maciços de solo-aglomerante(s) sem e com teores de 2% e 4% de RC e 2% de CBC e submetidos a ensaios de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade modificada. As amostras que apresentaram resultados mais significativos nos experimentos foram enviadas para a realização dos ensaios de DRX e MEV. A composição ternária, solo, 12% cimento e 4% RC e a quaternária, solo, 12% cimento, 2% CBC e 2% RC apresentaram os melhores resultados em relação às propriedades físicas e mecânicas anteriormente citadas.

**Palavras-chave:** cinza do bagaço da cana-de-açúcar, resíduo cerâmico, atividade pozolânica e tijolos maciços.

## ABSTRACT

The civil construction and agribusiness industries are under enormous pressure from the improvement of environmental legislation, aiming at the elaboration of processes and products that require less energy production and that can be reused at the end of their life cycle. In Brazilian agribusiness sugarcane is an agricultural product with the lowest production costs in the world. Calcination of sugarcane bagasse generates sugarcane bagasse (CBC) ash which is an environmental liability that can contaminate the soil and groundwater. This reality, concerning the generation of expressive volumes of waste, is repeated in the productive chain of civil construction, especially the losses resulting from the breaking of ceramic bricks, in the transportation, storage and use processes for the construction of masonry without structural purposes. The ceramic residue (RC), from the breaking of the ceramic brick, when comminuted will increase the specific surface of its particles and allow greater reactivity. Therefore, the use of CBC and RC in the process of manufacturing solid bricks of soil-binder (s) is technically feasible due to the possibility of occurrence of pozzolanic activity, that is, the formation of hydrated calcium silicates and aluminates resulting from recombination of the disorganized silica and alumina existing in the same and in the lateritic soil, with the portlandite phase ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), formed from the hydration of the cement and the chemical constitution of the hydrated lime. This scientific study carried out the mineralogical and chemical characterization of soil, lime, cement, CBC and RC. Then solid bricks of soil-binder (s) with and without 2% and 4% of RC and 2% of CBC were molded and subjected to tests of resistance to simple compression, water absorption and modified durability. The samples that presented the most significant results in the experiments were sent to perform the XRD and SEM tests. The ternary composition soil, 12% cement and 4% RC and the quaternary soil, 12% cement, 2% CBC and 2% RC showed the best results in relation to the aforementioned physical and mechanical properties.

**Keywords:** sugarcane ash, ceramic residue, pozzolanic activity and solid bricks.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos...	51
Tabela 2 - Nomenclatura das composições.....	76
Tabela 3 - Composição química do solo (%) .....	86
Tabela 4 - Composição química da cal (%) .....	87
Tabela 5 - Composição química do cimento (%) .....	87
Tabela 6 - Composição química do RC (%).....	88
Tabela 7 - Composição química da CBC (%) .....	89
Tabela 8 - Limites de Atterberg do solo e RC .....	94
Tabela 9 - Massa específica dos sólidos do solo e RC.....	95
Tabela 10 - Peso específico aparente máximo e umidade ótima .....	95
Tabela 11- Resistência à compressão simples das composições dos tijolos (valores médios).....	97
Tabela 12 - Absorção das composições dos tijolos. ....	100
Tabela 13 - Perda de massa das composições dos tijolos .....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de solos.....	32
Figura 2: Perfil típico de um solo residual.....	34
Figura 3: Perfil esquemático de ocorrência dos solos em ambiente tropical .....	37
Figura 4: Classificação adotada pela ASTM, AASHT, OMIT e ABNT.....	39
Figura 5: Estrutura de uma camada de caulinita; (a) atômica, (b) simbólica. .....	41
Figura 6: Silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (C-H). .....	54
Figura 7: Disposição final da CBC. ....	61
Figura 8: Fluxograma representativo do procedimento experimental. ...	72
Figura 9: Região da 1ª coleta do solo.....	73
Figura 10: Região da 2ª coleta do solo.....	74
Figura 11: CBC utilizada na pesquisa.....	75
Figura 12: Resíduo cerâmico utilizado na pesquisa. ....	75
Figura 13: Teste de retração.....	78
Figura 14: DRX do solo.....	86
Figura 15: DRX da cal.....	87
Figura 16: DRX do cimento.....	88
Figura 17: DRX do RC.....	89
Figura 18: DRX da CBC.....	89
Figura 19: Análise térmica da CBC.....	91
Figura 20: Curva de distribuição granulométrica do solo. ....	92
Figura 21: Curva de distribuição granulométrica do RC. ....	92
Figura 22: Curva de distribuição granulométrica da CBC.....	93
Figura 23: RCS dos tijolos moldados com cal e resíduos.....	98
Figura 24: RCS dos tijolos moldados com cimento e resíduos.....	99
Figura 25: RCS dos tijolos moldados com cal, cimento e resíduos. ....	100
Figura 26: Absorção dos tijolos moldados.....	101

Figura 27: Absorção de água dos tijolos moldados com cal, CBC e RC .....	102
Figura 28: Absorção de água dos tijolos moldados com cimento, CBC e RC .....	102
Figura 29: Perda de massa das composições dos tijolos .....	104
Figura 30: Perda de massa das composições com cal, cimento, RC e CBC.....	105
Figura 31: DRX da composição S12C .....	105
Figura 32: DRX da composição S12C4RC .....	106
Figura 33: DRX da composição S12C2CBC.....	106
Figura 34: DRX da composição S12C2CBC2RC .....	107
Figura 35: Micrografia do solo obtida por MEV. Ampliação 200X. ....	108
Figura 36: MEV da composição S12C2CBC. Ampliação 10KX .....	108
Figura 37: MEV da composição S12C2CBC. Ampliação 15KX .....	109
Figura 38: MEV da composição S12C2CBC2RC. Ampliação 20KX....	109
Figura 39: MEV da composição S12C2CBC2RC. Ampliação 30KX....	110
Figura 40: MEV da composição S6CH6C. Ampliação 10KX .....	110
Figura 41: MEV da composição S6CH6C. Ampliação 20KX .....	111
Figura 42: Tijolos produzidos na pesquisa.....	113



## 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
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção civil e Demolição
ACBC	Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar
AG	Análise Granulométrica
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
AP	Análise da Plasticidade
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico (celita)
CBC	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico (belita)
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico (alita)
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico (ferrita)
CNBM	China National Building Material
C-H	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CEPED	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do estado da Bahia
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
HRB	Highway Research Board
ISSMEF	Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações
IP	Índice de Plasticidade

LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LaPFiMC	Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos
MCT	Miniatura, Compactada, Tropical.
Mt	10 <sup>3</sup> toneladas
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Porosidade Aparente
PMI	Perda de Massa por Imersão
PSQ	Programa setorial de qualidade
RC	Resíduo cerâmico
RCD	Resíduo de construção e demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
USGS	Us. Geological Survey/Mineral Commodity Summaries
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
USCS	Unified Soil Classification System
W <sub>ot</sub>	Umidade Ótima
$\sigma_F$	Tensão de ruptura das composições pesquisadas
#	Simbologia de peneira

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>29</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	29
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	29
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>31</b>
3.1 SOLOS.....	31
3.1.1 Definição .....	31
3.1.2 Origem e formação.....	32
3.1.3 Tipos.....	34
3.1.4 Classificação geotécnica .....	37
3.1.5 Composição química e mineralógica.....	40
3.1.6 Estabilização .....	43
3.2 AGLOMERANTES .....	45
3.2.1 Cimento Portland.....	45
3.2.2 Cal .....	56
3.3 RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	58
3.3.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	58
3.3.2 Resíduo cerâmico .....	63
3.4 SOLO-CIMENTO.....	66
3.5 SOLO-CAL.....	68
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>72</b>
4.1 MATÉRIAS PRIMAS .....	73
4.1.1 Solo .....	73
4.1.2 Cimento .....	74

4.1.3 Cal .....	74
4.1.4 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	74
4.1.5 Resíduo cerâmico .....	75
4.1.6 Água .....	75
4.2 MÉTODOS .....	76
4.2.1 Composições aplicadas na pesquisa .....	76
4.2.2 Caracterização das matérias-primas .....	77
4.2.3. Ensaio tecnológicos (físicos e mecânicos) .....	80
4.2.4 Análise química e mineralógica das matérias-primas.....	83
4.2.5 Análise mineralógica das composições solo-aglomerante(s) com CBC e RC.....	83
4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	83
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>86</b>
5.1 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS .....	86
5.2 ANÁLISE TÉRMICA DA CBC.....	90
5.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	91
5.3.1 Análise granulométrica do solo .....	91
5.3.2 Análise granulométrica do resíduo cerâmico.....	92
5.3.3 Análise granulométrica da CBC .....	93
5.4 LIMITES DE ATTERBERG E MASSA ESPECÍFICA .....	93
5.5 TESTE DE RETRAÇÃO .....	95
5.6 COMPACTAÇÃO .....	95
5.7 ENSAIOS TECNOLÓGICOS .....	96
5.7.1 Resistência à compressão simples dos tijolos maciços .....	96
5.7.2 Absorção de água dos tijolos maciços .....	100
5.7.3 Durabilidade modificada dos tijolos maciços .....	103

5.8 ANÁLISE MINERALÓGICA DOS TIJOLOS .....	105
5.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	107
5.9.1 Análise da superfície de fratura das composições .....	108
5.10 ANÁLISE DA RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO REFERENTE À PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-AGLOMERANTE(S) COM RC E/OU CBC, COMPARANDO AO TIJOLO CERÂMICO CONVENCIONAL EXISTENTE NO MERCADO LOCAL.....	111
5.10.1 Quantitativos e encargos utilizados na análise:.....	111
5.10.2 Produção de 20 tijolos (dimensões 5,0 X 10,0 X 21,0 cm) da composição S12C4RC. Cálculo do custo unitário do tijolo.....	112
5.10.3 Produção de 20 tijolos (dimensões 5,0 X 10,0 X 21,0 cm) da composição S12C2CBC2RC. Cálculo do custo unitário do tijolo. ....	112
5.10.4 Comparação dos valores encontrados para os tijolos .....	113
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>115</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>117</b>

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem papel fundamental no processo de desenvolvimento de um país, possibilitando o aumento no número de empregos disponíveis, melhorando os níveis de renda da população e também viabilizando a aquisição da moradia. Entretanto, nos últimos anos, o mesmo tem crescido de uma certa forma desordenado, ocasionando sérios danos à natureza. Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2017), cerca de 20 a 50% de todos os recursos naturais disponíveis são consumidos por esse setor.

O cimento Portland, é um produto de grande consumo no setor da construção civil, contribuindo de maneira decisiva para esses danos causados à natureza. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2020), o consumo Brasileiro no ano de 2019 totalizou 54,5 milhões de toneladas, esse número representou um aumento de 3,5% em relação ao ano anterior, interrompendo um período de quatro anos de queda. No triênio 2015- 2017, as vendas de cimento acumularam uma retração de 24,2%, refletido pelo fraco desempenho da construção civil no triênio (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2018).

O processo produtivo do cimento é intensivo na emissão de gases de efeito estufa. A indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pelo homem. Apesar disso, no Brasil, muito em função de uma série de ações que o setor vem implementando há anos, esta participação é cerca de 2,6% (SNIC, 2019).

Particularmente, o Brasil é um dos países que emite menor quantidade de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento no mundo. Esta posição de destaque, ao mesmo tempo em que é um reconhecimento ao esforço do setor no combate às mudanças climáticas, representa um enorme desafio: produzir o cimento necessário ao desenvolvimento do país, buscando ao mesmo tempo soluções para reduzir ainda mais as suas emissões de CO<sub>2</sub> (SNIC, 2019).

A necessidade de se buscar o aperfeiçoamento de novas técnicas de reutilização e reciclagem dos resíduos produzidos torna-se cada vez mais evidentes. A utilização desses materiais objetiva dar um destino adequado aos mesmos, bem como em contribuir no desempenho do material quando o resíduo é incorporado na matriz cimentícia (VASCONCELOS, 2013).

As vantagens potenciais da reciclagem para a sociedade são, entre outras, a preservação de recursos naturais, economia de energia, redução do volume de aterros, redução da poluição, geração de empregos, redução do custo do controle ambiental pelas indústrias, aumento da durabilidade e, até mesmo, a economia de divisas (JOHN, 2000).

Estudos apontam que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), em virtude da presença predominante de sílica na composição química, apresenta-se como matéria-prima potencial na produção de cimentos compostos e de aditivos minerais para pastas, argamassas e concretos (BESSA, 2011; CÂMARA, 2015; PINHEIRO, 2015; SILVA, 2016).

O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, responsável por aproximadamente 20% da produção e 40% das exportações, (ÚNICA, 2017). A CBC é o produto da combustão da queima do bagaço da cana-de-açúcar, produzido pelas usinas sucroalcooleiras, na geração de energia para consumo próprio ou de terceiros. Para cada tonelada de bagaço são gerados 25 kg de cinza, constituindo-se um problema residual com descartes em aterros ou em áreas agrícolas (SALES; LIMA, 2010).

O uso da CBC em substituição parcial ao cimento, ou da ACBC (areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar) em substituição parcial aos agregados miúdos, pode contribuir para reduzir o impacto ambiental causado pela mineração de rochas ou pela extração de areia em suas jazidas e leitos de rios, que são beneficiados para serem utilizados em misturas de concreto e argamassa (SALES; LIMA, 2010).

Pozolanas são materiais com alto teor de sílica ou sílica e alumina no estado amorfo, que finamente subdivididos reagem quimicamente com hidróxido de cálcio em presença de água para formar produtos hidráulicos estáveis. O emprego de materiais pozolânicos pode promover uma redução substancial do consumo de aglomerantes, como por exemplo, o cimento Portland e a cal.

Vários materiais pozolânicos têm sido amplamente estudados, como cinzas volantes, sílica ativa, cinza da casca de arroz, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, cinza do capim elefante, tendo esses dois últimos merecido a atenção de pesquisadores nos últimos anos. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar por



si só é um resíduo de caráter pozolânico e fíler e, portanto, proporciona mudanças benéficas à estrutura hidratada (CASTALDELLI et al., 2013; MORAES et al., 2015).

Alguns estudos científicos vêm sendo realizados, dando ênfase ao reaproveitamento de resíduos industriais, como a CBC, utilizando esses resíduos como pozolana. Dentre esses, destaca-se a substituição parcial dos aglomerantes na produção de argamassas para assentamento e revestimento, aditivos minerais usados na fabricação de determinados tipos de cimentos e concretos e também como adições para melhorar as propriedades físicas e mecânicas de tijolos maciços de solo-cal, solo-cimento, etc. A incorporação de resíduos em tijolos de solo-cimento, solo-cal, etc. vem sendo utilizada em pesquisas científicas, apresentando resultados positivos.

Várias pesquisas foram desenvolvidas utilizando a CBC em misturas de concreto na substituição parcial do cimento nas misturas (DE PAULA et al., 2009; CORDEIRO et al., 2012; RUKZON; CHINDAPRASIRT, 2012; BAHURUDEEN et al., 2015). Outros trabalhos publicados utilizaram como matéria-prima a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) para fabricação de tijolos; FARIA; GURGEL; HOLANDA, 2010; MARQUES, 2015; entre outros.

Segundo a ABRECON (2016), do resíduo de construção e demolição (RCD) recebido pelas usinas de reciclagem no Brasil, em média, 11% é constituído por materiais cerâmicos e, do resíduo misto que compõe 69% do total de RCD, metade trata-se de material vermelho (cerâmicas vermelhas e componentes à base de argila) (FONSÊCA, 2018).

Estudos indicam que os resíduos de cerâmica vermelha, quando finamente moídos (material passante na # 200, 0,075mm), promovem a ocorrência de atividade pozolânica em contato com o cimento Portland e/ou cal, em presença de água. O resíduo cerâmico (RC) proveniente da quebra do bloco cerâmico aplicado na execução de alvenarias de vedação apresenta-se como uma alternativa viável devido sua comprovada atividade pozolânica quando submetido a processos de cominuição visando o aumento da sua superfície específica e reatividade, em meio aquoso, com o hidróxido de cálcio existente nos aglomerantes cimento e cal hidratada (SILVA, 2013).

Buscando uma maior sustentabilidade das atividades exercidas no setor da construção e procurando reaproveitar resíduos que apresentem certo grau de reatividade pozolânica, tem-se procurado reutilizar esses resíduos na confecção de produtos que apresentem uma melhor relação entre sua microestrutura e suas propriedades. A CBC e o RC, por apresentarem propriedades pozolânicas, podem substituir parcialmente os aglomerantes (como por exemplo, o cimento Portland e a cal). Pesquisadores anteriores, como SILVA (2013) e MARQUES (2015), que utilizaram o RC e a CBC respectivamente, substituindo parcialmente o aglomerante, conseguiram resultados significativos em suas pesquisas.

Os tijolos de solo-cimento e solo-cal, ambos incorporados com a CBC e o RC, podem promover a ocorrência da reação pozolânica, devido à existência de óxidos de sílica e alumina, na forma desorganizada (não cristalina), no solo intemperizado, na CBC e no RC. Estes poderão recombina-se com o hidróxido de cálcio proveniente da cal e/ou decorrente da hidratação cimentícia, contribuindo para a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo principal a moldagem de tijolos maciços, realizada em laboratório, compostos por misturas de solo-cimento e solo-cimento-cal com a incorporação de percentuais predeterminados de RC e CBC, buscando contribuir de certa maneira, através dos resultados encontrados, com outros trabalhos já realizados que utilizaram o RC e a CBC. Os percentuais de RC e CBC, utilizados na pesquisa, foram aplicados levando-se em consideração as pesquisas de SILVA (2013) e MARQUES (2015), respectivamente. SILVA (2013) encontrou resultados significativos utilizando o percentual de 4% para o RC. MARQUES (2015) obteve melhores resultados com a CBC utilizando o percentual de 2%.

A obtenção de parâmetros relativos à resistência à compressão simples, durabilidade modificada e absorção de água, em conformidade com o estabelecido pelas normas técnicas vigentes, foi o que se buscou nessa pesquisa. A princípio, foram realizados ensaios de caracterização física e química dos materiais utilizados na pesquisa e em seguida moldados os tijolos maciços adicionando a CBC e o RC em percentuais predeterminados.

Os resultados apresentados pela pesquisa contribuiram para uma melhor compreensão dos efeitos resultantes nas propriedades físicas e mecânicas das composições de solo-cimento e solo-cimento-cal, quando da adição da CBC e do RC aos mesmos. Os resultados experimentais comprovaram a eficiência e o elevado potencial de utilização da CBC e do RC, quando adicionados tanto nos tijolos de solo-cimento como nos tijolos de solo-cimento-cal, deixando os tijolos com um ganho na sua resistência e uma menor absorção de água, quando comparados com o tijolo de solo-cimento convencional.

A análise e discussão dos mecanismos envolvidos nas reações cimentícias e pozolânicas, poderá propiciar o surgimento de outras pesquisas que correlacionem aspectos macroscópicos constatados na engenharia civil, com os conhecimentos da microestrutura proporcionados pela ciência e engenharia de materiais.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS**

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Estudar as características e propriedades de tijolos maciços produzidos a partir das composições de solo-aglomerante(s), com a incorporação da CBC e/ou RC, para execução de alvenarias sem fins estruturais.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar as matérias-primas convencionais, através de ensaios específicos;

- Avaliar o comportamento físico e mecânico das misturas solo-aglomerante(s), com adição da CBC, RC, ou ambos, em tijolos maciços, através de ensaios de resistência à compressão simples (RCS), absorção de água (AA) e durabilidade modificada;

- Analisar a microestrutura de amostras das formulações utilizadas na produção dos tijolos maciços de solo-cimento e solo-cimento-cal, com a incorporação da CBC e/ou RC, por meio de ensaios de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV);

- Analisar a relação custo/benefício referente à produção de tijolos maciços a partir das formulações pesquisadas, quando comparado ao tijolo cerâmico convencional existente no mercado local.

## **CAPÍTULO 3**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

## **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1 SOLOS**

#### **3.1.1 Definição**

O termo solo, ao longo da história, teve várias definições sugeridas, dependendo dos objetivos e enfoques abordados. Segundo ORTIGÃO (2007), a definição do que é solo depende em muitos casos de quem o utiliza. Os agrônomos, por exemplo, o veem como um material de fixação de raízes e um grande armazém de nutrientes e água para as plantas. Para o geólogo de mineração, a capa de solo sobrejacente ao minério é simplesmente um material de rejeito a ser escavado. Para o engenheiro civil, os solos são um aglomerado de partículas provenientes de decomposição da rocha, que podem ser escavados com facilidade, sem o emprego de explosivos, e que são utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas.

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.

Na pedologia, até o século XIX, predominou a concepção geológica que considerava o solo apenas como sendo um manto de fragmentos e produtos de alteração, que reflete unicamente a composição mineralógica da rocha que lhe deu origem. No entanto, a constatação da existência de solos diferentes oriundos da mesma rocha, contribuiu para a formação de uma concepção mais genética, onde o solo é identificado como um material que evolui no tempo sob a ação dos fatores naturais ativos na superfície terrestre (SILVA, 2013). A Figura 1 apresenta alguns tipos de solos existentes.

Figura 1: Tipos de solos



Fonte: Autor

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 se destacam 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. NOGAMI et al., (2000), afirma que os solos são materiais naturais não consolidados, constituídos de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos, de fácil dispersão em água e que podem ser escavados com equipamentos comuns de terraplenagem (pá, carregadeira, etc.).

No âmbito da ciência do solo, o termo solo é empregado para definir os corpos naturais, ocupando porções na superfície terrestre, suportando plantas e as edificações humanas e que apresentam propriedades resultantes da atuação integrada do clima e dos organismos, atuando sobre o material de origem, condicionado pelo relevo, durante um período de tempo (SILVA, 2013).

### 3.1.2 Origem e formação

Os solos são provenientes da deterioração da rocha através de um processo denominado intemperismo, ou seja, a ação do tempo. As várias formas



de intemperismo podem ser classificadas em dois grandes grupos: intemperismo químico e intemperismo mecânico. O primeiro está relacionado com os vários processos químicos que alteram, solubilizam e depositam os minerais de rocha, transformando-a em solo. Esse tipo é mais frequente nos climas quentes e úmidos e, portanto, muito comum no Brasil. O segundo é proveniente da ação mecânica desagregadora de transporte da água, do vento e da variação de temperatura. Muitas vezes ocorre a ação conjunta de vários agentes do intemperismo. Os solos que permanecem próximos à rocha que lhes deu origem são denominados residuais; os demais são sedimentares ou transportados.

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. O solo é um sistema disperso, formado por três fases: sólida, líquida e gasosa (CABALA, 2007).

A formação do solo segue um ciclo evolutivo constituído de duas fases. Na primeira etapa, ou seja, na sua gênese ocorrem os diversos processos de intemperização das rochas que constituem a matéria básica da massa do solo. Na etapa posterior, a pedogênese, ocorre as transformações dos materiais intemperizados em solos ordenados e dispostos em camadas diferenciadas entre si por sua natureza física, química, mineralógica e biológica (SILVA, 2013).

Segundo GUSMÃO FILHO (2008), 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.

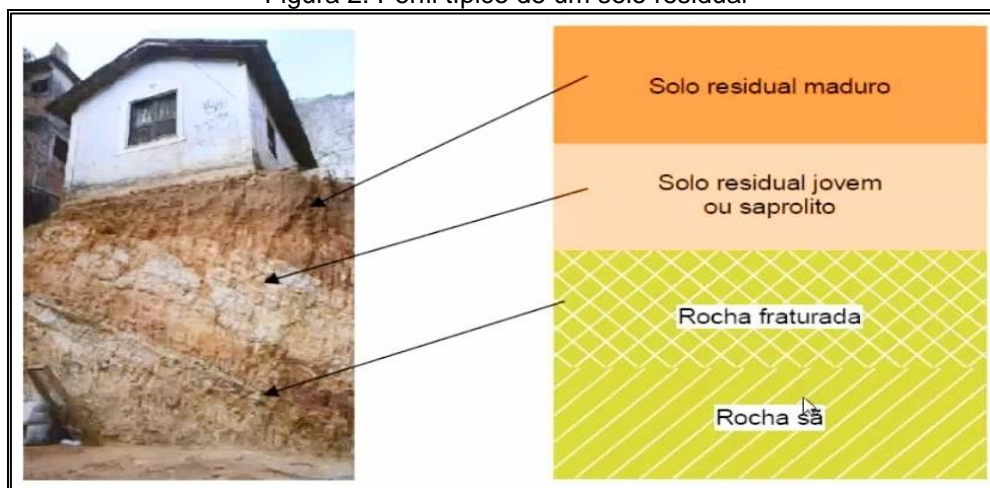
O intemperismo químico ocorre quando da degradação das rochas e minerais diversos, quando estes são expostos a infiltrações de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas na água, oriunda das precipitações pluviométricas. A água reage com os minerais presentes na rocha mãe formando cloretos, sulfatos, 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 ( $\text{CO}_2$ ) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) atmosférico 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 (GÓIS, 2012).

De acordo com OLIVEIRA et al., 1998, à medida que ocorre a intemperização do material de origem, o mesmo vai se diferenciando em seções denominadas camadas ou horizontes de solos. Esta diferenciação realiza-se por meio da incorporação da matéria orgânica e da migração da matéria mineral e orgânica para o interior do solo. A Figura 2 apresenta o perfil típico de um solo residual.

Figura 2: Perfil típico de um solo residual



Fonte: ORTIGÃO, 2007.

### 3.1.3 Tipos

De acordo com as dimensões das partículas constituintes, as frações dos solos recebem designações próprias que, segundo a NBR 6502/1995, são:

Pedregulho - solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0mm e 60 mm, sendo, quando arredondados ou semi-arredondados, denominados cascalho ou seixo;

Areia - solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm;

Silte - solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco o ar, formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm;

Argila - solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, que apresenta coesão e plasticidade.

VARGAS (1978) classifica os solos em três grupos: residuais, transportados e orgânicos. Os solos denominados residuais ou autóctones são constituídos a partir da decomposição das rochas pela ação do intemperismo biológico, físico e químico ou o somatório dos mesmos, permanecendo no local onde se formaram. As condições básicas que determinam a composição mineralógica, granulométrica, a estrutura e espessura das camadas, atributos estes que, por sua vez, definem a natureza desse solo são: clima, relevo, tempo de formação e tipo de rocha de origem.

Solos transportados ou alóctones são aqueles deslocados do ambiente onde foram originalmente formados por diversos agentes geológicos (água, vento, ação da gravidade, geleiras, etc.), sendo encontrados na forma não consolidada, podendo ser excelentes fontes de materiais de construção (PASTORE et al., 1998).

Solos orgânicos são aqueles oriundos da impregnação de matérias orgânicas em sedimentos preexistentes ou pela transformação carbonífera de materiais, em geral, de origem vegetal contido na estrutura sedimentada (VARGAS, 1978).

Através de estudos pedológicos e geotécnicos, concluiu-se que regiões com características climáticas tropicais e úmidas apresentam um tipo de solo denominado tropical. Geralmente, os solos tropicais estão distribuídos em países localizados entre os trópicos, no entanto esta condição não representa uma regra, pois segundo estudos científicos existentes, o solo tropical deverá possuir propriedades de processos geológicos e /ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas (NOGAMI et al., 1995).

FERNANDES (2005) esclarece que a nomenclatura dos solos tropicais é oriunda das condições climáticas atuantes e da sua gênese e que os mesmos podem ser distribuídos em duas classes: os solos lateríticos, bastante

intemperizados, ricos em minerais de argila e sesquióxidos, e os saprólíticos que preservam as estruturas da rocha matriz.

A condição tropical tem influência determinante na formação dos solos do Brasil, predominando a ocorrência de solos tropicais úmidos, tendo 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 (GÓIS, 2012).

MEDINA (1997) aponta as diferenças das condições ambientais entre países de clima predominantemente tropical e de clima temperado, destacando a situação geográfica do país e suas condições ambientais, mostrando que os solos lateríticos provenientes da intemperização intensa das rochas ou saprólitos de diversas origens abrangem cerca de 70% (setenta por cento) do território brasileiro.

O termo laterito é designado para os solos resultantes da ação do intemperismo sobre várias rochas e que contém uma elevada quantidade de silicatos de alumínio hidratados e óxidos de ferro, em climas tropicais. Os solos lateríticos são predominantemente cauliníticos (SILVA, 2013).

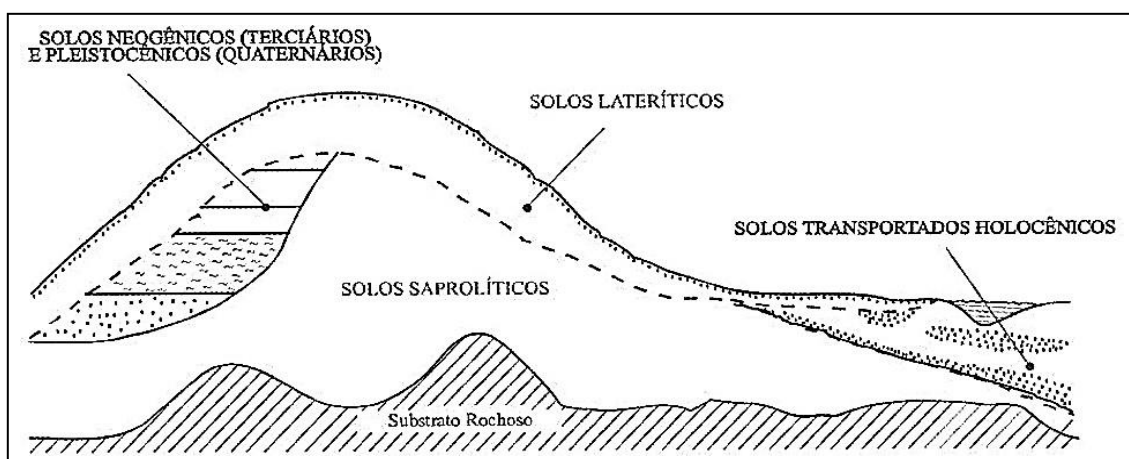
Segundo NOGAMI et al., 1985 apud MARAGON, 2004, solo laterítico é definido pelo Comitê de solos tropicais da associação internacional de mecânica dos solos e engenharia de fundações (ISSMEF) como aquele formado pelos horizontes A e B, de perfis bem drenados, desenvolvidos sob atuação de clima tropical úmido. Apresentam sua fração argila constituída essencialmente de

argilominerais do grupo da caulinita e de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio que confere a estrutura poros e agregações altamente estáveis

De acordo com PINTO (2006), os solos lateríticos, in natura, são geralmente não saturados, com índice de vazios elevado e reduzida capacidade de suporte. Através do processo de compactação podem ser reestruturados, apresentando contração se o teor de umidade diminuir, porém não sofrem expansão na presença de água. Essas características geotécnicas descritas estimulam o uso desses solos como preciosa fonte de matéria-prima em obras de terra e pavimentação, podendo ser aplicados em aterros, proteção de taludes contra erosão, estruturas de pavimentos como reforço de subleito, sub-bases e bases (BERNUCCI et al., 2002).

O tipo de solo predominante no Rio Grande do Norte é o latossolo vermelho-amarelo, ou seja, são solos não hidromórficos desenvolvidos em zonas de oxidação, em ótimas condições de drenagem, nunca afetado por lençol freático, muito profundo, poroso, com baixa densidade, alta permeabilidade no estado natural, apresentam excelentes qualidades físicas, notável resistência à erosão e possuem uma boa capacidade de armazenamento de água. A Figura 3 apresenta um perfil esquemático dos solos em ambiente tropical.

Figura 3: Perfil esquemático de ocorrência dos solos em ambiente tropical



Fonte: VILLIBOR & NOGAMI, 2009

### 3.1.4 Classificação geotécnica

CAPUTO (2011), afirma que o solo é definido como residual quando os produtos da rocha alterada permanecem no local onde ocorreu a desagregação.

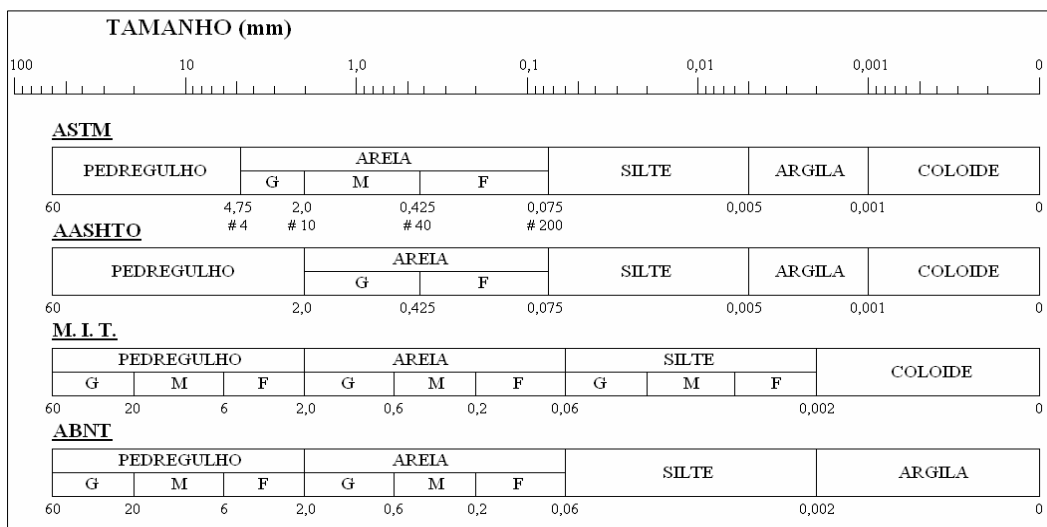
O solo passa a ser denominado como sedimentar, quando transportados para local diferente de onde se originou. A desintegração física pela água, temperatura, e vento forma a fração granulométrica grossa do solo, e pela decomposição química ocorre o processo em que há a modificação química ou mineralógica 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) (GÓIS, 2012).

O estudo do solo devido à complexidade dos processos de formação e das características variadas, não permite a aplicação de um modelo matemático ou um ensaio em modelo reduzido que caracterize, de forma satisfatória, seu comportamento como um todo. Restando apenas a utilização de aproximação de modelos que possam dar resultados satisfatórios para seu entendimento (RESENDE, 2002).

As primeiras classificações dos solos baseavam-se na análise primária dos mesmos através de testes visuais, bastante imprecisos, e na distribuição granulométrica das suas partículas. Esses parâmetros são aceitáveis para determinar o comportamento dos denominados solos grossos, ou seja, aplica-se a curva granulométrica para definir a distribuição das diferentes dimensões dos grãos e uma escala de classificação que define a posição relativa desse solo nos quatro grupos: pedregulhos, areias, siltes e argilas (SILVA, 2013). A Figura 4 apresenta as classificações granulométricas mais aplicadas.

Figura 4: Classificação adotada pela ASTM, AASHT, OMIT e ABNT.



Fonte: DMC/UFRGS, 2000.

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 (GÓIS, 2012).

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.

No início da década de oitenta do século XX, os pesquisadores NOGAMI e VILLIBOR desenvolveram uma sistemática de caracterização e classificação de solos tropicais denominada MCT (miniatura, compactada, tropical). Esta classificação é baseada em ensaios de laboratório, como compactação e imersão em água, a partir de corpos de prova compactados e de dimensões reduzidas que representam situações a que os solos são submetidos quando compactados e aplicados em obras viárias. Essa metodologia permite classificar os solos em lateríticos ou não lateríticos, quanto ao seu comportamento depois da compactação (SILVA, 2013).

Ainda 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.

### **3.1.5 Composição química e mineralógica**

Os minerais encontrados nos solos são os mesmos das rochas de origem (minerais primários), além de outros que se formam na decomposição (minerais secundários). Quanto à composição química dos principais minerais componentes, os solos grossos são agrupados em:

- silicatos - feldspato, mica, quartzo, serpentina, clorita, talco;
- óxidos - hematita, magnetita, limonita;
- carbonatos - calcita, dolomita;
- sulfatos - gesso, anidrita.

Um mineral é uma substância inorgânica e natural, com composição química e estrutura definida. Das suas propriedades físicas de maior interesse para a engenharia, destacam-se a densidade e a dureza. Para a maioria dos minerais não metálicos a densidade varia entre 2,65 e 2,85.

Os minerais silicatos e óxidos são dominantes da crosta terrestre cujas propriedades dependem das condições físicas e químicas de sua formação. Os silicatos podem ser agrupados, conforme o arranjo espacial, em 6 (seis) classes: ciclossilicatos, filossilicatos, inossilicatos, ortossilicatos, sorossilicatos e tectossilicatos (SANTOS, 1989).

Quartzo, feldspato, micas, piroxênios, etc., (minerais primários) são geogênicos, isto é, oriundos da rocha matriz, apresentando menor reatividade quando comparados aos minerais secundários, devido sua maior superfície específica e uma reduzida quantidade de defeitos e de substituições de átomos. O quartzo, presente na maioria das rochas, é bastante resistente à desagregação e forma grãos de silte e areia, no solo entanto, os feldspatos são os minerais mais atacados pela natureza, originando os argilominerais, que formam a porção mais fina dos solos, geralmente com dimensão inferior a 2,0 mm.

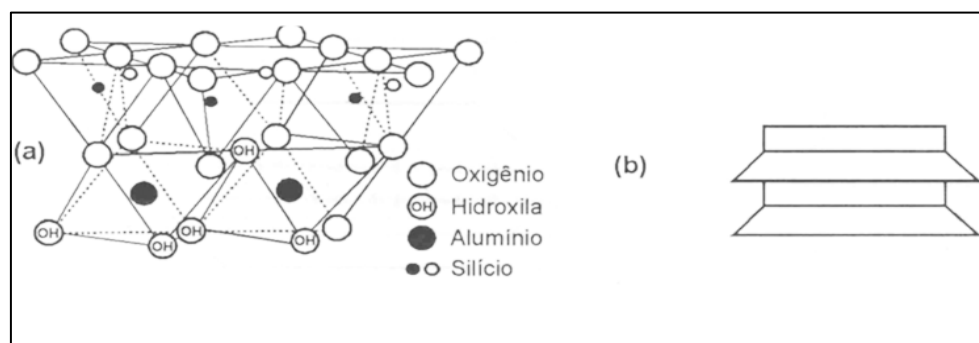
Os argilominerais cristalinos podem ser subdivididos em duas classes: silicatos cristalinos com reticulado em camadas ou lâminas (filossilicatos) e os silicatos cristalinos com reticulado de estrutura fibrosa (sepiolita e paligorsquita



ou atapulgita). Os filossilicatos são materiais com estrutura lamelar e constituem o grupo de silicatos mais aplicados na indústria da cerâmica tradicional (ACCHAR, 2006).

A caulinita é o argilomineral mais encontrado na natureza. Sua composição química é  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4$  ou  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , sendo composta por uma lâmina silícica de  $\text{SiO}_4$  e outra de alumínio  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ , também denominada folha de gibbsite, que se superpõem indefinidamente, resultando em uma estrutura fortemente polar. A união entre todas as camadas é suficientemente firme (pontes de hidrogênio) para não permitir a passagem das moléculas de água entre elas. A fórmula estrutural da célula unitária é  $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  e a proporção em óxidos tem a seguinte composição:  $\text{SiO}_2 = 46,54\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 39,5\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} = 13,96\%$  (BRINDLEY, 1961). As caulinitas são os argilominerais mais estáveis em presença de água, apresentando baixa atividade, reduzido potencial de expansão quando em processo de saturação e uma distância interplanar basal de 0,716 nm (7,16 Å). A Figura 5 apresenta uma representação esquemática da estrutura da caulinita.

Figura 5: Estrutura de uma camada de caulinita; (a) atômica, (b) simbólica.



Fonte: BRINDLEY, 1961

Os feldspatos são silicatos duplos de Al e de um metal alcalino ou alcalino-terroso (K, Na ou Ca). Os principais são: ortoclasita, anortita e albita. Há, ainda, combinações dos dois últimos, chamados plagioclásios. Os feldspatos sofrem decomposição mais ou menos acentuada pelos agentes da natureza; pela ação da água carregada de  $\text{CO}_2$  é característica a alteração em argila branca, denominada caulim. As micas são, geralmente, ortossilicatos de Al, Mg, K, Na ou Li e, mais raramente, de Mn e Cr. Distinguem-se imediatamente por suas delgadas lâminas flexíveis e por sua clivagem extremamente fácil. Os principais

tipos são a muscovita (mica branca) e a biotita (mica preta). Nos solos, as micas aparecem sob a forma de pequenas escamas brilhantes, conferindo-lhes um brilho característico, e as cores as mais variadas e vivas.

O quartzo é o mais importante dos minerais do grupo dos silicatos. Sua composição química é  $\text{SiO}_2$ , sílica cristalina pura. Os seus cristais apresentam a forma de um prisma hexagonal tendo, nas suas bases, pirâmides hexagonais. São facilmente identificados macroscopicamente. Devido à sua estabilidade química e dureza, é um dos minerais mais resistentes aos habituais agentes de intemperismo, tais como a água e a variação de temperatura; por isso, passa quase que incólume da rocha aos solos. O quartzo apresenta-se também em formas amorfas, como é o caso da opala.

Dentre os silicatos incluem-se ainda a serpentina (que dá origem à rocha de mesmo nome), a clorita e o talco; os dois primeiros de tonalidades verdes e, o último, branco ou branco-esverdeado. A hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e a limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) são os principais minerais entre os óxidos de ferro. No grupo dos carbonatos, os mais importantes minerais são a calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) e a dolomita [ $(\text{CO}_3)_2 \text{CaMg}$ ]. Embora tenham propriedades físicas semelhantes, a dolomita difere da calcita pela sua maior dureza e fraca reação (mesmo quando pulverizada) em contato com o HCl.

Dentre os sulfatos citam-se o gesso ( $\text{SO}_4 \text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e a anidrita ( $\text{SO}_4 \text{Ca}$ ), os quais se diferenciam pelo teor de "água estrutural" e, conseqüentemente, pelos valores da densidade e da dureza. Entre os solos finos (partículas menores que 0,075 mm), as argilas apresentam uma complexa constituição química. A sua análise revela serem constituídas basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em forma coloidal e sesquióxidos metálicos da forma geral  $\text{R}_2\text{O}_3$ , onde o símbolo R refere-se ao Al e ao Fe. A razão (em peso)  $\text{SiO}_2 / \text{R}_2\text{O}_3 = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ , chamada razão de sesquióxidos, varia de 1,33 a 2,00 para os solos lateríticos, sendo maior que 2,00 para os solos não-lateríticos. A Laterização ou latolização é o processo característico de regiões tropicais de clima úmido e estações chuvosas e secas alternadas, segundo o qual, por lixiviação, processa-se a remoção da sílica coloidal, e o enriquecimento dos solos e rochas em ferro e alumina.

### 3.1.6 Estabilização

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

A estabilização consiste no tratamento do solo, por um processo mecânico, ou químico, tornando-o estável para os limites de sua utilização, e permanecendo assim, mesmo sob a ação de cargas exteriores e ações climáticas. Entre os principais métodos de estabilização de solos tem-se a compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizantes químicos; estes podem ser usados individualmente ou em conjunto. A escolha do tipo de estabilização a ser realizado deve ter viabilidade técnica e econômica, para tanto, é necessário conhecer melhor os métodos de estabilização de solos, dos mais tradicionais até as novas técnicas disponíveis no mercado (REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR, 2017).

O solo como encontrado na natureza, na maioria das vezes, não apresenta o comportamento adequado para determinado fim, gerando a necessidade de adição de algum aglomerante para melhorar suas propriedades. O tratamento com cal trata-se de uma técnica amplamente empregada para alcançar o melhoramento de solos utilizados na construção civil (WANG, 2017).

A expressão estabilização de solos refere-se, em seu sentido mais amplo, a todo processo através do qual o solo melhora suas características, adquirindo assim as propriedades necessárias ao fim que se destina. O processo de estabilização é bastante antigo, existindo relatos na literatura científica que confirmam o uso de técnicas primitivas em obras viárias e civis (NOBREGA, 1985).

Na granulométrica, as melhorias introduzidas no comportamento do solo originam-se de mudanças no seu sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso), adicionando ou retirando partículas ao solo. Na estabilização elétrica, ocorre na passagem de uma corrente elétrica pelo solo a estabilizar. No adensamento de solos arenosos saturados são ministradas descargas sucessivas de alta tensão

enquanto nos solos argilosos são aplicadas descargas de baixa tensão. (LIMA et al., 1993).

A estabilização térmica pode ser realizada por congelamento, aquecimento e termosose. No congelamento altera-se temporariamente a textura do solo, enquanto no aquecimento procura-se rearranjar a rede cristalina dos minerais constituintes do solo. A termosose corresponde a uma técnica de drenagem que permite a difusão de um fluido em um meio poroso, através de gradientes de temperaturas (SILVA, 2013).

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

Além desses processos já citados, é importante também ser destacado o processo físico-químico que associa à ação mecânica da compactação para reduzir os vazios, aumentando a interação entre a superfície das partículas com teores de ligantes, que através da hidratação, inicia as reações cimentícias e pozolânicas, entre os argilominerais dos solos e os compostos químicos desses aglomerantes aumentando com isso a resistência do solo tratado.

As normas nacionais vigentes estabelecem alguns critérios que devem ser considerados na escolha de solos para a estabilização com o cimento Portland visando a produção de tijolos maciços. A NBR 10833/2012, prescreve os critérios para a seleção dos solos, destinados à fabricação dos tijolos maciços de solo-cimento:

- Porcentagem de material passando na peneira ABNT Nº 4 (4,8 mm) - 100%
- Porcentagem de material passando na peneira ABNT Nº 200 (0,075 mm) - 10 a 50%
- Limite de Liquidez  $\leq 45\%$
- Índice de Plasticidade  $\leq 18\%$

O processo de estabilização do solo com o cimento ocorre a partir do desenvolvimento de reações químicas geradas na hidratação dos seus

compostos e os argilominerais do solo. Esse processo pode ser dividido em duas etapas, a primeira referente à hidratação do  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$  e  $C_4F$ .

## **3.2 AGLOMERANTES**

### **3.2.1 Cimento Portland**

A palavra cimento é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejava. A origem do cimento remonta há cerca de 4500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob ação da água (ABCP, 2012).

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto às pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland. Na Roma antiga misturava-se a cal com materiais provenientes das erupções vulcânicas resultando em um produto que endurecia, até na presença de água, e era denominado de “caementum”, termo que originou a palavra cimento (AOKI et al., 1996).

No Brasil, estudos para aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreram aparentemente em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica na fazenda Santo Antônio, de sua propriedade, situada em Sorocaba-SP. Várias iniciativas

esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas nessa época. Assim, chegou a funcionar durante apenas três meses, em 1892, uma pequena instalação produtora na ilha de Tiriri, na Paraíba, cuja construção data de 1890, por iniciativa do engenheiro Louis Felipe Alves da Nóbrega, que estudara na França e chegara ao Brasil com novas ideias, tendo inclusive o projeto da fábrica pronto e publicado em livro de sua autoria. Atribui-se o fracasso do empreendimento não à qualidade do produto, mas à distância dos centros consumidores e à pequena escala de produção, que não conseguia competitividade com os cimentos importados da época.

A usina de Rodovalho lançou em 1897 sua primeira produção – o cimento marca Santo Antônio – e operou até 1904, quando interrompeu suas atividades. Voltou em 1907, mas experimentou problemas de qualidade e extinguiu-se definitivamente em 1918. Em Cachoeiro do Itapemirim, o governo do Espírito Santo fundou, em 1912, uma fábrica que funcionou até 1924, com precariedade e produção de apenas 8.000 toneladas por ano, sendo então paralisada, voltando a funcionar em 1935, após modernização.

Todas essas etapas não passaram de meras tentativas que culminaram, em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje.

Em 2017, a produção mundial de cimento totalizou 4,1 bilhões de toneladas (US. GEOLOGICAL SURVEY/MINERAL COMMODITY SUMMARIES – USGS, 2016). No ranking mundial, o Brasil caiu da 9ª posição para 12ª posição (em relação a 2016), com participação de 1,3%. A China segue como líder. O mercado mundial de cimento movimenta cerca de US\$ 250 bilhões de dólares/ano, sem contar com a China, que responde por mais da metade da produção e do consumo mundial, sendo abastecida, praticamente, por empresas

locais e, entre elas, alguns dos maiores produtores de cimento do mundo, a gigante estatal chinesa a CNBM - *China National Building Material* que é a maior produtora de cimento do mundo, com capacidade instalada de 343 milhões de toneladas de cimento/ano (CIMENTO.ORG - 2014).

Em 2017, a indústria brasileira de cimento operou com 24 grupos nacionais e estrangeiros e 100 fábricas. Os grupos nacionais participam com mais de 50% do mercado. O mercado de cimento é regionalizado e distribuído por todo o território nacional, apresentando preços diferenciados nas regiões mais distantes dos principais centros produtores, devido ao custo de transporte. O transporte mais utilizado para distribuição do cimento nacional é o rodoviário, responsável por 94%, o ferroviário, 3%, e o hidroviário, 3%, este último geralmente utilizado na região Norte.

De acordo com BEZERRA (2006), o cimento Portland domina o mercado mundial devido ao seu custo de produção ser inferior aos apresentados pelos outros cimentos disponíveis e também às suas propriedades. A explicação para esta supremacia pode estar ligada ao fato que o cimento Portland é mais antigo e conseguiu montar um parque industrial que permitiu a redução de custos devido ao grande volume de produção. O cimento é um material de elevada finura constituído da combinação de clínquer e gesso e cuja produção demanda alto nível de energia térmica (EL-ATTAR et al., 2017).

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico obtido pela pulverização do clínquer Portland, resultante da calcinação até fusão incipiente (20 a 30% de fase líquida) de mistura dosada de materiais calcários e argilosos sem adições posteriores de outras substâncias a não ser gipsita (sulfato de cálcio). A adição de gipsita, feita após a clinquerização (4% em média), tem a finalidade de regular o tempo de início da pega. A mistura para a fabricação deste clínquer tem uma composição aproximada de 76% de calcário e 24% de rochas argilosas (argilas, xistos, ardósias, escórias de alto forno). Assim, chega-se a uma especificação média para os calcários destinados à fabricação de cimento. Eles devem ter mais de 75% de  $\text{CaCO}_3$ , menos de 3% de  $\text{MgO}$  e menos de 0,5% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2018).

A ASTM C 150 define cimento Portland como aglomerante hidráulico produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de sulfato de cálcio.

Para cada tonelada de cimento, tipicamente, é necessário o emprego de 1,4 t de calcário, 100-300 kg de argila e 30-40 kg de gipsita. Nos últimos anos tem havido o emprego de escória siderúrgicas de alto-forno, o chamado clínquer siderúrgico, que vem sendo empregado para dar maior qualidade ao cimento, em termos de resistência e impermeabilidade, e outros resíduos industriais, substituindo parcialmente as matérias-primas minerais usadas como aditivos. Como resultado, para produção de uma tonelada de clínquer, utiliza-se cerca de 1,3 t de calcário. Na sequência, para a fabricação do cimento, é requerido 0,68 t de clínquer, ou seja, cada tonelada de cimento produzido corresponde ao uso de 884 kg de calcário (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2018).

As adições representam outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na etapa de cominuição, possibilitam a fabricação de vários tipos de cimento Portland disponíveis no mercado hoje. As matérias-primas citadas são basicamente, o gesso, as escórias de alto forno, os materiais pozolânicos e os carbonáticos.

A priori, a redução de custos no processo de fabricação do cimento foi a razão principal para o desenvolvimento da tecnologia de produção dos cimentos compostos. Porém, a ampliação das pesquisas relacionadas com a microestrutura e propriedades do concreto possibilitou a constatação de vantagens adicionais no uso de cimentos compostos quando comparados ao cimento comum, além da redução da energia aplicada no processo produtivo.

#### **a. Composição química**

O cimento Portland produzido consiste em um material pulverulento, formado a partir de complexos silicatos e aluminatos, que em meio aquoso, hidratam-se, formando uma pasta que endurece e atinge elevada resistência mecânica e durabilidade perante diversos agentes deletérios.

Na microestrutura do cimento Portland destacam-se os seguintes componentes químicos: cal ( $\text{CaO}$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que combinados formam as quatro principais fases cristalinas, ou



seja, silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$ , alita), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ , belita), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$ , celita) e ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$ , brownmillerita).

Segundo a Associação brasileira de cimento Portland, 2002, o cimento denominado Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente na composição química desse aglomerante, enquanto que as adições podem variar de um tipo de cimento para outro.

FACHINI (2010), afirma que o cimento Portland é a denominação formal, para o material conhecido na construção civil como cimento. Trata-se de um material pulverulento com propriedades aglomerantes, que endurecem sob ação da água. Depois de endurecido, desde que se encontre em situação equilibrada, o cimento Portland apresenta resistência à decomposição mesmo que seja novamente submetido à ação da água.

O clínquer, principal matéria prima utilizada na fabricação cimento Portland, é constituído de silicatos e aluminatos de cálcio que passam por um processo industrial de moagem e queima. As matérias primas do clínquer devem conter cálcio, silício, alumínio e ferro em proporções adequadas, para posterior produção dos silicatos constituintes do cimento. O carbonato de cálcio é encontrado principalmente nas formas de pedra calcária, giz, mármore e concha do mar, e entre suas principais impurezas encontra-se a argila e dolomita (PAULA, 2006).

As reações químicas que ocorrem para a formação do cimento podem ser assim representadas (MEHTA e MONTEIRO, 2014):



Em representação estequiométrica, tem-se (3 e 4):



MEHTA e MONTEIRO (2014), afirma que o silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e o silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) constituem os principais componentes na composição química do cimento, e tratam-se dos responsáveis pela resistência

mecânica da pasta. O aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é o componente que mais rapidamente hidrata, já o ferro-aluminatotetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) não tem contribuição relevante para a resistência mecânica da pasta a longo prazo, porém tem a função de equilibrar a composição química da pasta por apresentar boa estabilidade química.

### **b. Classificação**

Vários tipos de cimento Portland (CP) são encontrados no mercado brasileiro em função dos compostos que são empregados na sua fabricação. Os cimentos aplicados no país são normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e são classificados em dois grupos: cimentos de uso geral para emprego na construção civil e cimentos especiais para cimentação de poços de petróleo. A ABCP normaliza o cimento Portland 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.

Os cimentos Portland aplicados na execução das diversas atividades e produtos necessários na indústria da construção civil estão elencados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

Sigla	Denominação	Norma	Resistência (Mpa)	Composição básica (% em massa)			
				Clinker +gesso	Escória	Pozolana	Calcarío -fíler
<b>CPI</b>	Comum	NBR-5732	25-32-40	100			
<b>CPI-S</b>	Comum com adição	NBR-5732	25-32-40	95-99	1-5	1-5	1-5
<b>CPI-RS</b>	Resistente a sulfatos	NBR-5737					
<b>CPII-E</b>	Composto com escória	NBR-11578	25-32-40	56-94	6-34		0-10
<b>CPII-Z</b>	Composto com pozolana	NBR-11578	25-32-40	76-94		6-14	0-10
<b>CPII-F</b>	Composto com fíler	NBR-11578	25-32-40	90-94			6-10
<b>CPIII</b>	De alto forno	NBR-5735	25-32-40	25-65	25-65	35-70	0-5
<b>CPIV</b>	pozolânico	NBR-5736	25-32	45-85		15-50	0-5
<b>CPV-ARI</b>	De alta resist. Inicial	NBR-5733	ARI	95-100			0-5

Fonte: ABCP, 2012

No processo de fabricação dos cimentos compostos com adições de calcário, o fíler que é um material pulverizado pode ser incluído até um determinado percentual, visando melhorar propriedades físicas do concreto, tais como, densidade, trabalhabilidade, permeabilidade, exsudação (NEVILLE, 1997). Geralmente, os fílers aplicados são inertes, no entanto, esse material pode ativar a hidratação do cimento, através da formação de pontos de nucleação, que possibilite a incorporação parcial do  $\text{CaCO}_3$  na fase silicato de cálcio hidratado, beneficiando a microestrutura da pasta de cimento (MORAES, 2015). No Brasil, a norma NBR 16697/2018, prescreve que o fíler deverá ser formado por um percentual mínimo de 85% de carbonato de cálcio e apresentar depois da moagem realizada, um teor de finura próximo àquele existente nas partículas anidras do cimento Portland.

Esse tipo de cimento foi regulamentado em 1991, no Brasil. No decorrer do tempo, sua comercialização aumentou bastante, sendo responsável por 75% da produção nacional, na atualidade. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) recomenda o cimento Portland com adição do fíler calcário para estabilização dos solos.

### c. Hidratação

As análises microestruturais do processo de hidratação do cimento constataram, nos estágios iniciais da reação, a predominância do mecanismo dissolução-precipitação que compreende a completa reorganização dos constituintes dos compostos originais durante a hidratação, ou seja, corresponde a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, a formação de hidratos em solução e, devido a sua reduzida solubilidade, uma eventual precipitação de hidratos resultantes da solução supersaturada (MEHTA et al., 2008). 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 certo tempo da mistura a pasta não é mais trabalhável.

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 ( $C_3S$  e  $C_2S$ ), aluminato ( $C_3A$ ) e

ferro-aluminato de cálcio ( $C_4AF$ ), e compostos hidratados como C-S-H, o hidróxido de cálcio, a etringita, e o monossulfato de alumínio.

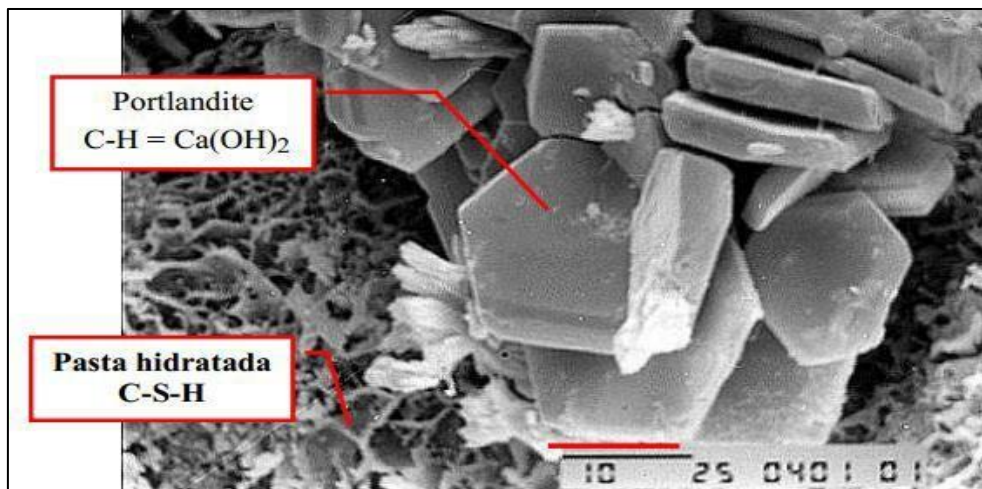
Nas etapas posteriores, destaca-se a reação topoquímica ou hidratação no estado sólido do cimento, cujas reações químicas ocorrem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro sem que os mesmos entrem em solução, devido às restrições existentes na mobilidade iônica dos constituintes desses compostos.

A heterogeneidade dos compostos formadores do cimento Portland, contribui para que ocorram variações na velocidade de hidratação dos mesmos, ou, seja os aluminatos hidratam-se rapidamente e determinam as características da perda de consistência e da solidificação da pasta de cimento. Enquanto isso, os silicatos (tricálcico e dicálcico) quando hidratados formam silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) que são fundamentais no aumento das taxas de desenvolvimento da resistência mecânica (SILVA, 2013).

A hidratação descreve as reações entre o cimento e a água produzindo um material sólido, a partir de transformações dos compostos químicos anidros, solúveis, presentes na composição do cimento em compostos hidratados como, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e a portlandita (C-H) (STEPKOWSKA et al., 2002). A Figura 6 apresenta o C-S-H e o C-H presentes na composição do cimento.

O C-S-H constitui a principal fase sólida de uma pasta de cimento Portland hidratada. É o principal responsável pelo ganho de resistência mecânica e durabilidade dos compósitos cimentícios. Segundo MEHTA e MONTEIRO (2014) isso se deve basicamente à sua morfologia, em camadas, que resulta em uma elevada área superficial. Comparado ao C-S-H, o hidróxido de cálcio contribui consideravelmente menos, em termos de resistência, o que pode-se justificar devido à sua área superficial significativamente menor. Os sulfoaluminatos de cálcio, por sua vez, desempenham um papel secundário nas relações microestrutura-propriedades de uma pasta de cimento hidratada (FONSÊCA, 2018).

Figura 6: Silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (C-H).



Fonte: FONSÊCA, 2018 (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014)

Os compostos anidros do cimento ao entrarem em contato com a água formam fases hidratadas com características específicas, destacando-se os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio hidratados. De acordo com BLACK et al., 2003, a hidratação do  $C_3S$  e  $C_2S$  produz uma série de silicatos de cálcio hidratados, também denominados de tobermorita, cuja morfologia das estruturas variam de amorfas até cristalinas, devido à relação Ca/Si e o percentual de água quimicamente combinada.

Nas primeiras horas do processo de hidratação do cimento, o  $C_3S$  é considerado o principal responsável pela resistência mecânica constatada, pois a hidratação do  $C_2S$  ocorre lentamente, apresentando um baixo calor de hidratação. A fase cristalina  $C_2S$  contribui pouco para o desenvolvimento da resistência da pasta de cimento nesse período inicial das reações químicas, no entanto, a partir de idades mais avançadas, o  $C_2S$  assume papel fundamental no aumento da resistência mecânica da pasta de cimento. Além disso, cálculos estequiométricos constataram que a hidratação completa do  $C_3S$  produz 61% de silicato hidratado de cálcio (C-S-H) e 39% de cal ou hidróxido de cálcio (C-H), enquanto que o  $C_2S$  gera 82% de C-S-H e 18% de cal livre ou C-H (MEHTA et al., 2008).

No contexto da hidratação dos compostos  $C_3S$  e  $C_2S$ , também, surge uma fase chamada de portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) que constitui de 20% a 25% de volume

de sólidos na pasta hidratada. Sua presença é constatada pela existência da cal livre e as reações de hidratação dos silicatos anteriormente citadas. Durante o processo de formação dessa fase, um percentual da portlandita cristaliza-se sob a forma de prismas hexagonais e a outra fica em solução reagindo com os aluminatos e com o ferroaluminato monocálcico. O  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  contribui pouco para o aumento da resistência da pasta de cimento, e como é bastante solúvel em água e mais propenso a lixiviação e carbonatação, pode comprometer a durabilidade da pasta endurecida, quando exposta aos ataques químicos de águas ácidas e sulfatadas (MEHTA et al., 2008).

Complementando o estudo da hidratação do cimento Portland verifica-se, nas idades iniciais, a geração da fase denominada etringita oriunda das reações entre os aluminatos, sulfatos de cálcio (BAUR et al., 2004). A quantidade de etringita aumenta com o tempo produzindo cristais em forma de agulhas de diferentes dimensões. De acordo com COLLEPARDI (2003), ocupam 15% a 20% de volume de sólidos na pasta endurecida e sua reação está associada à expansão.

Finalmente vários pesquisadores analisando os resultados decorrentes da adição de carbonatos no fenômeno da hidratação do cimento Portland composto (CPII F-32), constataram o efeito fíler inerte. De acordo com LAWRENCE (2003), esse efeito acontece primeiramente pelo fornecimento de novos pontos de nucleação nas superfícies dos quais os produtos da hidratação das fases anidras se desenvolvem. O citado autor afirma que três efeitos principais ocorrem ao adicionarem filers ao cimento, dois deles relacionados diretamente com a diluição do cimento, ou seja, a menor quantidade de partículas de cimento por unidade de volume e a modificação da distribuição granulométrica dos materiais anidros, proporcionando um aumento na relação água/cimento. O terceiro e último efeito constatado é a nucleação heterogênea, que é um processo físico que conduz à ativação química da hidratação do cimento. Genericamente está relacionada com a precipitação dos hidratos sobre uma partícula mineral, a qual cataliza o processo de nucleação (hidratação) ao reduzir a barreira energética necessária à sua implementação (LAWRENCE, 2003).

### 3.2.2 Cal

A humanidade conheceu a cal provavelmente no período Paleolítico, também conhecido por idade da pedra, havendo evidências do uso da cal ao longo de toda escala evolutiva da espécie humana. A cal passou a ser empregada efetivamente nas construções pela civilização egípcia, que detinha amplo conhecimento sobre seu manuseio. Há registros de sua utilização em diversas obras da antiguidade como a pirâmide de Quéops, no Egito, as muralhas de Jericó e da China e a Via Ápia em Roma (GUIMARÃES, 2002).

Os primeiros registros da utilização da cal no Brasil datam de 1549, quando o governador Tomé de Souza, fundou a primeira mineração de calcário para fabricação de cal virgem, que seria empregada nas argamassas para construção do casario da cidade de Salvador (GÓIS, 2012). O grande surto da construção civil, o crescimento da indústria do açúcar, o aparecimento da indústria de celulose e da “grande” siderurgia no mercado, como portentosos e exigentes usuários da cal, levaram, a partir da década de 50, a indústria brasileira de calcinação de calcários/dolomitos para um estágio de rápido desenvolvimento tecnológico e produtivo (ABPC, 1990).

Outros registros demonstram a importância do beneficiamento do calcário para utilização da cal em argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias em cidades coloniais como Ouro Preto/MG, Paraty/RJ e Olinda/PE (SILVA, 2013). A maioria da cal produzida no Brasil resulta da calcinação de calcários/dolomitos metamórficos, de idades geológicas diferentes; geralmente muito antiga (pré-cambriana) e pureza variável. As provenientes de calcários sedimentares e de concheiros naturais recentes, participam de maneira subordinada na produção (ABPC, 1990).

Em geral, na região sul-sudeste predominam as cales provenientes de dolomitos e calcários magnesianos e na região nordeste-norte-centro as resultantes de calcários. O principal produto da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas é a cal virgem, também denominada cal viva e cal ordinária.

O termo cal virgem é o consagrado, na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, para designar o produto



composto predominantemente por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900 – 1200°C, de calcários, calcários magnesianos e dolomitos. No mercado global da cal, a cal virgem cálcica predomina, particularmente, pela sua aplicação nas áreas das indústrias siderúrgicas, de açúcar e de celulose. Todas elas, quer cálcicas, quer magnesianas, são comercializadas em recipientes plásticos, metálicos e outros ou a granel, na forma de blocos (tal como sai do forno), britada (partículas de diâmetro 1 a 6 cm), moída e pulverizada (85% a 95% passando na peneira 0,149 mm).

Outro tipo de cal muito comum no mercado é a cal hidratada. É ela um pó de cor branca resultante da combinação química dos óxidos anidros da cal virgem com a água. É classificada, também, conforme o hidróxido predominante presente, ou melhor, de acordo com a cal virgem que lhe dá origem, em: cal hidratada cálcica, magnésiana e dolomítica. A cal hidratada, geralmente, é embarcada em recipientes plásticos ou em sacos de papel “kraft” (com 8, 20 e 40 quilos do produto), numa granulometria 85% abaixo de 0,075 mm (# 200).

No Brasil, as diversificadas áreas de consumo de cal são supridas por mais de 200 produtores distribuídos pelo país. A capacidade de produção de suas instalações varia de 1 a 1000 toneladas de cal virgem/dia.

As propriedades químicas do calcário e da qualidade da queima são determinantes para definir a qualidade comercial de uma cal. A cal é constituída basicamente de óxidos de cálcio ou de uma mistura de óxidos de cálcio e magnésio e pode ser apresentada sob a forma de pedras ou moídas e ensacadas. Necessita-se de 1,7 – 1,8 t de rocha calcária para a fabricação de uma tonelada de cal virgem. Com uma tonelada de cal virgem obtém-se cerca de 1,3 t de cal hidratada.

Nos últimos anos a estrutura da produção da cal vem se mantendo praticamente inalterada, com a fração ou parcela da cal virgem correspondendo a 73% da produção nacional e a cal hidratada representando 27%.

Em 2017, a produção mundial foi de 350 milhões de toneladas. A China permaneceu liderando, com participação de 66%. O Brasil, participando com 2,3% ocupou a 5ª posição no cenário internacional (USGS – MINERAL

COMMODITY 2017). Estimou-se a produção brasileira em 8,3 milhões de toneladas, representada pelos produtores integrados (79%); mercado cativo (15%); mercado cativo produtores não integrados (3%) e transformadores (3%). As regiões sudeste e sul do país são responsáveis por 85% da produção de cal virgem e hidratada. Em Minas Gerais localizam-se as principais indústrias de cal do país, com produção anual acima de 5 Mt ( $10^3$  toneladas).

De acordo com a Associação brasileira dos produtores de cal – ABPC, em 2014 (últimos dados disponíveis), o perfil do consumo ficou assim distribuído:

- Indústria siderúrgica 36%;
- Construção civil 29%;
- Indústria química 8%;
- Papel e celulose 7%;
- Pelotização e mineração de ferro 6%;
- Indústria alimentícia 5%;
- Meio ambiente 2%;
- Metalurgia não ferrosos 2%;
- Agricultura e outros 5%.

A cal teve uma grande redução na sua utilização quando da descoberta e ampliação da fabricação do cimento Portland. Essa redução também aconteceu, principalmente pelo fato do processo produtivo da cal ser de baixo controle e também bastante artesanal resultando no questionamento da qualidade do produto fabricado. No entanto, a cal ainda se trata de um produto amplamente utilizado pelas indústrias siderúrgicas, de papel e celulose, farmacêutica e alimentícia. Utiliza-se ainda, a cal, no tratamento de água para controle do pH e para o tratamento de solos.

### **3.3 RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

#### **3.3.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene pertencente ao gênero *Saccharum*, da família das gramíneas, oriunda de regiões temperadas quentes e tropicais da Ásia, particularmente da Índia. A cana-de-açúcar no gênero

Saccharum, possui as seguintes espécies: *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. barberi*, *S. sinense*, *S. edule* e *S. robustum* (CHEN e CHOU, 1993).

É um produto agrícola originado do sudeste da Ásia; e é cultivada no Brasil desde a colonização portuguesa. A cana foi trazida para o Brasil em 1532 por Martin Afonso de Sousa, tendo a zona da mata nordestina como a principal região de produção; desde então passou a ter significativa importância para o país (BRASIL, 2007a).

A cana-de-açúcar começou a ser utilizada em construções e como alimento nas montanhas de Nova Guiné, sudoeste do oceano pacífico, em torno do século VI A.C. O primeiro engenho brasileiro foi construído em São Vicente, litoral de São Paulo. Como consequência, ocorreu um grande desenvolvimento deste povoado e de outros vilarejos circunvizinhos, dando-se início ao ciclo da cana-de-açúcar no Brasil (ÚNICA, 2010).

É um dos principais produtos agrícolas do Brasil, ocupando a primeira posição no ranking mundial da cultura. Trata-se de um produto agrícola altamente qualificado e com os menores custos de produção do mundo e, devido às grandes áreas disponíveis, possui um grande potencial para aumento da área cultivada. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana, mas ocupa, também, o primeiro lugar no mundo em produção de açúcar e etanol, destacando-se no cenário mundial com a produção deste biocombustível como fonte alternativa de produção energética (ÚNICA, 2010).

No Brasil, a área cultivada de cana-de-açúcar dedicada à atividade sucroalcooleira, na safra 2015/2016, foi estimada pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (ÚNICA, 2016) em aproximadamente 10.245.102 hectares, distribuídos em todos os estados produtores, apresentando em destaque os estados da região Centro-Sul, responsáveis por aproximadamente 87% da produção nacional. A região Norte-Nordeste, tradicional produtora de cana-de-açúcar, mas que vem perdendo posições, participou com cerca de 13% do total da área cultivada no país. O total de cana-de-açúcar moído na safra 2017/18 foi de 641.066 milhões de toneladas (ÚNICA, 2018).

Segundo TOMMASELLI et al., 2011, os principais subprodutos da indústria sucroalcooleira, são: folhas e pontas, água de lavagem, bagaço, torta

de filtro, leveduras e vinhaça. A água empregada na lavagem da cana antes da moagem pode ser reutilizada na fabricação de biogás e na fertirrigação. O bagaço é utilizado na produção de energia, como combustível, na produção de ração por hidrólise, polpa de papel, celulose e aglomerados. As pontas e folhas podem ser utilizadas como forragem, além dos mesmos empregos do bagaço. O vinhoto é utilizado como fertilizante na adubação dos canaviais. Para CORDEIRO (2006), a torta de filtro, subproduto do procedimento de clarificação do caldo na fabricação do açúcar, e a levedura, produzida após a fermentação do caldo, são também empregadas na adubação (REZENDE, 2016).

Com o aumento da produção de cana-de-açúcar, transformada em combustível, surgiram também o crescimento do volume de resíduos, como o bagaço oriundo desse processamento. O bagaço da cana-de-açúcar, por exemplo, era considerado um problema ambiental, e uma das poucas vantagens comerciais era a sua destinação para alimentação de animais em confinamento, entretanto era utilizado em pequena quantidade frente aos volumes gerados nas usinas (REZENDE, 2016).

Na atualidade, o cenário é outro. A partir de novas tecnologias e demandas, o bagaço da cana-de-açúcar, até então um resíduo altamente poluidor, passou a ser uma importante fonte de geração de energia elétrica e de renda para os consumidores. O resíduo passou a ser queimado com o intuito de produzir energia a ponto de ser hoje uma importante fonte de renda. Segundo TOMMASELLI et al., 2011, com a queima, são gerados outros resíduos, como os gases produzidos pela combustão e as cinzas, que ainda se avolumam nos pátios das usinas.

O montante de bagaço gerado está relacionado ao teor de fibra da cana processada, apresentando, aproximadamente, 46% de fibra e 50% de umidade e produzindo, em valores médios, aproximadamente 260 quilos de bagaço por tonelada de cana processada (CORTEZ et al., 1992). Pelo volume em que é gerado e devido à sua composição, o bagaço tornou-se um dos mais importantes subprodutos para a indústria sucroalcooleira (TOMMASELLI et al., 2011). Entre seus principais empregos tem-se: combustível para caldeira, produção de celulose e alimentação de gado confinado (REZENDE, 2016).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) é obtida a partir da queima do bagaço da cana nas fornalhas das caldeiras das usinas produtoras de açúcar e álcool. A produção da cinza inicia-se com o plantio da cana e posteriormente a queima da lavoura para auxiliar na colheita. Nesse processo é gerada a cinza da palha, em seguida, aplica-se a moagem da cana, resultando no bagaço úmido, este é queimado nas fornalhas para a cogeração de energia, gerando como produto final a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (FREITAS, 2005).

De acordo com TOMMASELLI et al., 2011, parte das cinzas geradas retorna para o solo dos canaviais, sob forma de adubo, embora existam dúvidas a respeito dessa prática, pois a presença de alguns metais pesados, provenientes de fertilizantes na composição da cinza, podem contaminar o solo, as águas superficiais e os lençóis freáticos. A maior parte desse resíduo, não possuindo outra forma de utilização na cadeia produtiva, é estocada nos pátios das usinas. A Figura 7, mostra a disposição final da CBC após a queima do bagaço.

Figura 7: Disposição final da CBC.



Fonte: SOUZA et al., 2007.

As condições de queima do bagaço influenciam as características da cinza. O bagaço apresenta boa ignição, embora normalmente apresente um elevado teor de umidade. Tal fenômeno se dá devido ao grande teor de materiais voláteis presentes neste resíduo, aproximadamente 87% em base seca, representando cerca de 78% do poder calorífico, e consomem aproximadamente 74% do ar de combustão (PELLEGRINI, 2002). A umidade do bagaço influencia

diretamente no rendimento da combustão, assim como as características da cinza produzida. Se o teor de umidade é de 50%, a temperatura de ignição do bagaço estará entre 500°C e 600°C, temperatura que diminui para 300°C a 400°C quando a umidade está entre 35% e 40% (COELHO, 1999).

A temperatura de queima do bagaço da cana-de-açúcar irá definir o surgimento das distintas fases da sílica (amorfas ou cristalinas), onde a presença de material cristalino nas cinzas é devida às altas temperaturas de combustão nas caldeiras (MARTINERA HERNÁNDEZ et al., 2000; NEHDI et al., 2003). Segundo PAULA (2006), além da temperatura, o tempo de queima também influencia a forma e a quantidade da sílica.

O bagaço da cana-de-açúcar é um dos resíduos orgânicos de maior expressão, capaz de servir como fonte de minerais a serem utilizados na produção industrial de diversos materiais. Para cada tonelada de bagaço são gerados 25 kg de cinzas, constituindo-se em um problema residual, sendo comumente descartadas em aterros ou em áreas agrícolas.

A CBC apresenta em sua composição um alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), além de pequenas quantidades de óxidos de Al, Fe, Ca, Mg e K. Isto significa que do ponto de vista químico, esse material contém quantidades apreciáveis de óxidos presentes nas argilas usadas na fabricação de cerâmica vermelha. Além disso, por apresentar alto teor de sílica, a CBC é considerada um material não plástico e inerte. Estas características a tornam um atrativo como matéria-prima alternativa para fabricação de materiais de cerâmica vermelha (PARANHOS, 2015).

Quanto da existência da pozolanicidade na CBC os autores CORDEIRO (2006); PAULA (2006); CORDEIRO (2009); NUNES (2009); ZARDO et al., (2004) relatam que ainda não é definitiva, embora em sua pesquisa FREITAS (2005) aponta a atividade pozolânica de amostras de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, já ZARDO et al., (2004) revela o contrário mostrando que esse tipo de material atua como filler. Portanto, todos os pesquisadores citados apresentam aspectos benéficos do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, quer seja pelo o efeito filler quer seja pelo o efeito pozolânico (SILVA, 2016).

Alguns estudos científicos sobre a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar foram realizados por alguns autores, entre eles: MARQUES (2015), que desenvolveu seus estudos incorporando a CBC na obtenção de tijolos de resíduo-cimento; KAZMI, et al., (2016), desenvolveu tijolos de argila sustentáveis utilizando resíduos de bagaço de cana de açúcar; JORDAN, et al., (2019), desenvolveu tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço da cana-de-açúcar, entre outros.

### **3.3.2 Resíduo cerâmico**

No período anterior ao surgimento do cimento Portland, as argamassas eram obtidas da mistura de tijolos moídos e cal hidratada. Esse material formado pela combinação de pedaços de tijolos cerâmicos e pó, teve seu uso bastante difundido no império romano na época Bizantina. Talvez desconhecêssem os mecanismos envolvidos no processo de endurecimento dessas formulações, mas sabiam por experiências que as mesmas resultavam produtos resistentes à água e a umidade (BARÔNIO, 1997).

A cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, integra o setor dos minerais não metálicos da indústria da transformação mineral, fazendo parte do conjunto de cadeias produtivas que compõem o complexo da construção civil. No Brasil os principais produtos do setor de cerâmica vermelha são: blocos, tijolos, telhas, elementos vazados, lajes, lajotas, ladrilhos vermelhos, tubos, agregados leves, além de produtos para outros fins como argilas piro expandidas, objetos ornamentais e utensílios domésticos. O setor brasileiro é o principal fornecedor de materiais para alvenarias e coberturas para uso residencial e comercial. Utiliza basicamente a argila comum como principal fonte de matéria-prima. A partir da produção estimada de 63,6 bilhões de peças/ano de cerâmica (ANICER), considerando a massa média de 2,0 kg/peça, pode-se estimar a utilização de aproximadamente 140 Mt de argila (ANUÁRIO, 2018).

A indústria de cerâmica vermelha demanda profissionais qualificados para atuar nas áreas de composição de materiais, realização de conformidade e qualidade e na gestão dos empreendimentos. Entretanto, predomina no setor a desqualificação e o baixo nível de instrução formal da mão de obra. Segundo a

ANICER o segmento representa 4,8% da indústria da construção civil e gera cerca de 300 mil empregos diretos e 900 mil indiretos. O grande número de pequenas unidades produtivas desta indústria e sua distribuição pulverizada nos vários estados contribui para que, de modo geral, o setor apresente grande deficiência de dados estatísticos de produção e indicadores de desempenho consolidados, ferramentas indispensáveis para acompanhar o seu desenvolvimento e monitorar sua competitividade.

De acordo com a ANICER o número de empresas é de, aproximadamente, 7.400. Iniciativas dos próprios empresários, liderados pela ANICER e associações estaduais, em parceria com SEBRAE e SENAI, têm implantado mudanças no segmento nos últimos anos. Mostrou ainda que o segmento teve aumento de 70% de empresas qualificadas no Programa setorial de qualidade - PSQ de blocos cerâmicos e de 57% de empresas qualificadas de telhas cerâmicas. Também de acordo com a ANICER (2016), no Rio Grande do Norte, a indústria de cerâmica vermelha é composta por 186 empresas formalizadas distribuídas em 42 municípios, empregando aproximadamente 6,4 mil trabalhadores e chega a movimentar anualmente, cerca de 208 milhões de reais. Segundo o SEBRAE (2011) a indústria da cerâmica vermelha no Brasil é composta, em sua maior parte, por empresas de pequeno e médio porte. A produção nacional ceramista divide-se entre as cerâmicas brancas, vermelhas e refratárias, das quais a produção de cerâmica vermelha é a mais representativa.

Os romanos empregavam também rochas vulcânicas contendo zeolita, que é uma denominação genérica de silicatos hidratados de alumínio e/ou cálcio. Esse mineral era encontrado aos pés do monte Vesúvio, em Pozzuoli. Devido ao nome da cidade, o material ficou conhecido como pozolana (MEHTA, 2008).

Segundo MEHTA, MONTEIRO (2014), materiais pozolânicos são aqueles silicosos ou sílico-aluminosos que, individualmente, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, porém, quando finamente moídos e em presença de umidade reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes.

A reação pozolânica ocorre entre a pozolana e o hidróxido de cálcio. Segundo MEHTA & MONTEIRO (2014), a reação acontece em velocidade lenta



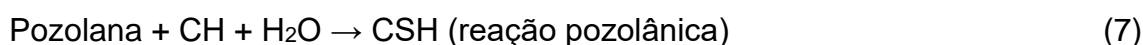
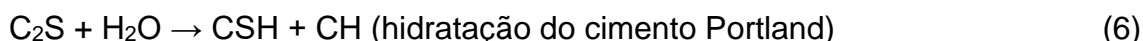
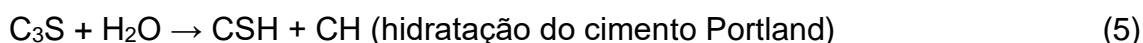
e, portanto, ocorre baixa liberação de calor na hidratação e o desenvolvimento de resistência mecânica se dá de forma lenta.

Os materiais pozolânicos, de acordo com a NBR 12653/2014, são classificados em três classes:

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

A NBR 12653/2014 estabelece determinadas exigências para que um material seja classificado como pozolânico. Quanto à composição química, a Norma exige que a quantidade de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  deve ser de, no mínimo, 70% para os materiais das classes N e C, e de pelo menos 50% para os da classe E (FONSÊCA, 2018).

MEHTA (2008), afirma que a principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento Portland, como o  $\text{C}_3\text{S}$  e o  $\text{C}_2\text{S}$ . Essas reações podem ser descritas da seguinte forma:



Onde:

$\text{C}_3\text{S}$  = Silicato tricálcico;

$\text{C}_2\text{S}$  = Silicato dicálcico;

CH = Hidróxido de cálcio;

CSH = Silicato de cálcio hidratado

Para GARCIA et al., (2015), a granulometria do material tem grande influência na reação pozolânica, pois quanto mais finamente particulado for o material, tanto maior será a reatividade desenvolvida. VIEIRA, 2002, estudou a aplicação de resíduos de cerâmica vermelha (telhas, tijolos, etc.) como substituição pozolânica em argamassas e concretos e concluiu ser viável esta

possibilidade. Verificou que o resíduo tem índice de atividade pozolânica satisfatória, tanto para sistemas com cal quanto o cimento, apenas para finuras superiores a 5000 cm<sup>2</sup>/g.

### 3.4 SOLO-CIMENTO

De acordo com a ABCP, o solo-cimento é o produto resultante da mistura de solo, cimento Portland e água que, compactados ao teor ótimo de umidade e sob a máxima densidade, em proporções previamente estabelecidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento.

De acordo com ANDRADE FILHO (1989), a conceituação do solo-cimento teve origem em Sallsburg no ano de 1917. O autor afirma, entretanto, haver poucos usos relatados até 1932, quando se tem notícia dos primeiros trabalhos cientificamente controlados, através da sua utilização na pavimentação de 17.000 m<sup>2</sup> em Johnsonville, Carolina do Sul, EUA (SEGANTINI, 2000).

No Brasil o interesse surgiu a partir de 1936 com a regulamentação do seu uso pela ABCP. Inicialmente o solo cimento foi utilizado na confecção de bases e sub-bases de pavimentos da estrada. HEISE (2004) relata que as primeiras construções no Brasil com solo-cimento foram o aeroporto de Petrolina (PE) e a construção de residências em Petrópolis (RJ) no início da década de 1940. Nesta mesma época o autor relata que o arquiteto Lucio Costa, utilizou o sistema construtivo de pau-a-pique e o painel monolítico de solo-cimento em um projeto que desenvolveu para a construção da Vila Operária de João Monlevade (MG). O bom estado de conservação em edificações que se encontram hoje atesta claramente a qualidade do material e da técnica construtiva. A partir daí o uso do solo-cimento foi consideravelmente ampliado devido às vantagens técnicas e econômicas que o material oferece.

ABIKO (1995), afirma que a primeira aplicação conhecida do solo-cimento para edificação residencial é datada de aproximadamente 10.000 anos, na construção da cidade de Jericó, que foi totalmente construída com solo (porém o estabilizante utilizado era urina animal e dejetos vegetais).

Para MARQUES (2015), o solo-cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa

resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade. Segundo NEVES (2000), solo-cimento é uma mistura de solo, cimento e água que, quando compactada, adquire a resistência mecânica e a durabilidade necessárias para fins de construção.

GRANDE (2003), afirma que, ao se adicionar cimento ao solo obtém-se um material que não sofre grandes variações volumétricas pela absorção e perda de umidade, e não se deteriora completamente quando submerso em água, além de apresentar elevada resistência à compressão e durabilidade por apresentar uma menor permeabilidade. Para VARGAS (1977), o solo-cimento é obtido pela mistura de solo, pulverizado e umedecido na umidade ótima de compactação, com 7 a 14% de cimento Portland em relação ao volume de solo compactado.

Os tijolos de solo-cimento, assim como os blocos de solo-cimento, constituem alternativas bastante vantajosas para a execução da alvenaria em habitações e outras edificações. A utilização desses materiais proporciona muitas vantagens, desde a fabricação até a aplicação no canteiro de obras. Os equipamentos utilizados são simples e de baixo custo, permitindo operação no próprio canteiro. A resistência à compressão, em geral, é superior à do tijolo de barro cozido, e a qualidade final é superior, pois o material apresenta textura uniforme, dimensões regulares e superfícies planas. Do ponto de vista ecológico, são bastante atrativos, pois não passam pelo processo de cozimento, onde ocorre o consumo de grandes quantidades de madeira ou de óleo combustível, como acontece no caso dos tijolos produzidos em cerâmicas e olarias.

A NBR 8491/2012, estabelece que a resistência média à compressão dos tijolos não deve ser inferior a 2,0 Mpa aos sete dias, e a absorção média deve ser inferior a 20%. Os solos mais adequados para a confecção do solo-cimento compactado são os que apresentam:

- 100% das partículas passando na peneira 4,8 mm;
- De 10% a 50% passando na peneira 0,075 mm;
- Limite de liquidez:  $\leq 45\%$ ;
- Índice de plasticidade:  $\leq 18\%$ .

Solos que apresentam essas características propiciam condições para que se tenha menor consumo de cimento e tijolos de melhor qualidade. Existem

no mercado empresas que oferecem diversos modelos de prensas para a fabricação dos tijolos. Algumas prensas fabricam até sete tipos diferentes de tijolos, bastando para isso apenas trocar os seus moldes.

Nos tijolos de solo-cimento a maior quantidade de matéria-prima é o solo. Os solos são materiais que se diferenciam de área para área, tanto qualitativamente, quanto quantitativamente, por isso ele é largamente utilizado como matéria-prima na indústria da construção civil, estando aí incluso, a fabricação de tijolos de solo-cimento.

O uso da técnica de solo-cimento tem um menor custo construtivo tanto na confecção de tijolos, como também em encostas, contenções de barreiras de rodovias, contra pisos de rodagem em rodovias e pistas de rodagem de aeroportos.

Existem alguns fatores que influenciam nas propriedades de resistência dos tijolos fabricados com solo-cimento tais como: características do solo utilizado; teor de cimento da mistura; grau de finura do cimento utilizado; grau de homogeneização da mistura; densificação da mistura na prensagem (ou fator de empacotamento da mistura); tempo e condição de cura da mistura após a prensagem; aditivos empregados.

Segundo MARQUES (2015), quando o cimento e o solo são misturados de forma ineficiente, pequenos aumentos na uniformidade ocasionam pequenos aumentos de resistência. Em amostras bem misturadas, um pequeno aumento na uniformidade levará a grandes aumentos na resistência.

Na confecção de tijolos fabricados com solo-cimento, um dos fatores mais importantes a ser considerado é a prensagem (ou compactação), pois se ela não for bem executada os tijolos sofrerão uma grande perda na sua resistência. Por isso, a escolha da máquina de prensagem tem uma grande importância na qualidade final do tijolo.

### **3.5 SOLO-CAL**

Quando um solo não tem as características geotécnicas exigidas para suportar a obra projetada, principalmente quanto à sua resistência, torna-se necessário corrigi-lo ou substituí-lo por outro, com a adição ou subtração de componentes, ou com a ação de agentes químicos (orgânicos ou inorgânicos).

A escolha da técnica deve ser baseada na economia e ainda na finalidade da obra. A estabilização ou melhoria dos solos instáveis com adições de cal é uma das mais antigas técnicas empregadas pelo homem. Há exemplos encontrados ao sul da Itália, na Via Apia, entre a Posta Capena-Capua-Brindisi, construída no ano 312 a.C. e num trecho da muralha da China, datado de 228 a.C. (GÓIS, 2012).

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 (GÓIS, 2012).

Segundo 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 interação 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 ( $\text{CO}_2$ ), 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. A adição da cal aos solos provoca mudanças favoráveis quanto à plasticidade, granulometria e aos limites de Atterberg (limites de plasticidade e liquidez e índice de plasticidade), às variações de volume e à resistência. Isso também ocorre quanto aos valores relativos à compactação, à densidade, ao teor de umidade ótimo, à retenção de água e à acidez do solo (GÓIS, 2012).

A partir da mistura de solo, cal e água são possíveis produzir tijolos, cuja resistência mecânica é semelhante à dos blocos cerâmicos convencionais e cujo processo de fabricação é significativamente simples, envolvendo equipamentos pouco complexos e de baixo custo, resultando na redução do valor final do produto. Além disso, a produção de tijolos de solo-cal dispensa a etapa de sinterização, que além de ser responsável pela emissão de gases poluentes, ainda eleva o valor final do produto devido ao custo associado à energia necessária para o processo de queima (FONSÊCA, 2018).

A cal pode ser considerada como uma alternativa viável para substituir o cimento, pelo menos de forma parcial. Ela apresenta um processo de produção menos poluente que o cimento. O seu uso adicionado ao cimento é plenamente justificado, pois dessa maneira, reduz-se a quantidade de cimento consumido, diminuindo conseqüentemente a emissão de CO<sub>2</sub> na natureza, gerados durante o processo de produção do cimento. Outra vantagem dessa adição da cal ao cimento é o custo, pois a mesma apresenta um custo menor quando comparado ao do cimento.

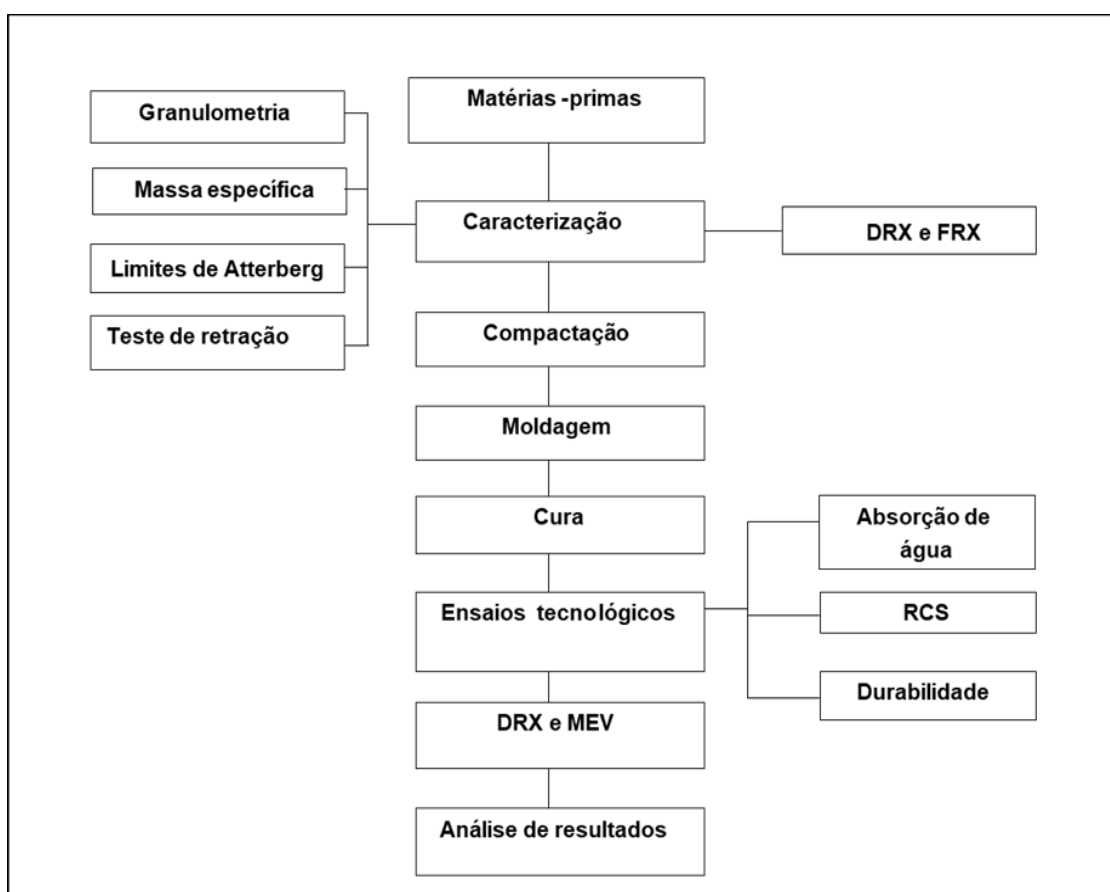
## **CAPÍTULO 4**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho empregada foi fundamentada na caracterização física e química das matérias-primas utilizadas, bem como na determinação dos parâmetros de resistência à compressão simples, absorção de água e durabilidade modificada dos produtos finais. Através de ensaios de laboratório, foi realizada a caracterização do solo, dos aglomerantes, da CBC, do RC, das composições solo-aglomerante(s) com adição da CBC e RC, e de amostras dos tijolos maciços prensados, conforme fluxograma apresentado na Figura 8.

Figura 8: Fluxograma representativo do procedimento experimental.



Fonte: Autor.

A caracterização física dos materiais foi realizada nos laboratórios de Mecânica dos Solos e Materiais de Construção da UFRN. As análises químicas foram realizadas nos laboratórios de Pós-graduação de Ciência e Engenharia



de Materiais (PPGCEM) da UFRN. As características das matérias-primas e composições utilizadas neste trabalho assim como as justificativas das mesmas são descritas a seguir.

#### **4.1 MATÉRIAS PRIMAS**

##### **4.1.1 Solo**

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no trecho compreendido entre as cidades de São José de Mipibú e Goianinha, no estado do Rio Grande do Norte, na BR-101 (km 126), nas proximidades do rio Baldun. O solo foi escolhido, por já ter sido utilizado em pesquisas anteriores de GÓIS (2012) e SILVA (2013). Os referidos pesquisadores, através de uma carta topográfica e de uma análise inicial no local, perceberam inicialmente que o solo era de boa qualidade para utilização em solo-cimento e solo-cimento-cal, sendo isso comprovado após a caracterização do mesmo. Esse tipo de solo é comumente encontrado nessa região do Rio Grande do Norte.

Depois de coletado, o solo foi levado ao laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN, onde inicialmente passou pelo processo de secagem ao ar (ao ambiente natural) ficando protegido da ação do intemperismo. Após a secagem, o solo foi destorroado e peneirado através da # nº 4, abertura 4,8 mm. As Figuras 9 e 10, a seguir, mostram a região onde o solo foi coletado. A Figura 9 mostra o local da 1ª coleta, no ano de 2010.

Figura 9: Região da 1ª coleta do solo



Fonte: Autor

A Figura 10 mostra o local da 2ª coleta, no ano de 2018.

Figura 10: Região da 2ª coleta do solo



Fonte: Autor

#### **4.1.2 Cimento**

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento composto CP II F-32. Este tipo de cimento 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.

#### **4.1.3 Cal**

Na pesquisa foi utilizada a cal cálcica hidratada, CH-II (NBR 7175/2003), conforme recomendação da Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC), programa setorial da qualidade da cal hidratada para a construção civil (2013). Essa cal é conhecida comercialmente como Rebocal, fabricada no município de Campina Grande no estado da Paraíba.

#### **4.1.4 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

A CBC utilizada na pesquisa foi coletada na usina Monte Alegre, localizada na cidade de Mamanguape no estado da Paraíba. A cinza utilizada foi obtida através da queima do bagaço da cana-de-açúcar e coletada da caldeira. A CBC foi refinada para ajuste da granulometria na faixa próxima a do cimento Portland (próxima a # 200). A Figura 11 mostra a CBC utilizada na pesquisa.

Figura 11: CBC utilizada na pesquisa.



Fonte: Autor

#### **4.1.5 Resíduo cerâmico**

O RC foi coletado na cidade de Natal/RN, em obras de pequeno e médio porte, sendo oriundos de tijolos cerâmicos fabricados na cerâmica Ouro Branco, localizada no município de Ielmo Marinho/RN, sendo peneirado na # 200 para utilização na pesquisa. A Figura 12 a seguir, apresenta o resíduo cerâmico utilizado na pesquisa.

Figura 12: Resíduo cerâmico utilizado na pesquisa.



Fonte: Autor

#### **4.1.6 Água**

A água utilizada na pesquisa foi proveniente do sistema de abastecimento público da cidade de Natal/RN, fornecida pela CAERN.

## 4.2 MÉTODOS

### 4. 2.1 Composições aplicadas na pesquisa

Os percentuais dos resíduos adicionados nas composições de solo-aglomerante(s) em relação à massa do solo foram 2% de CBC, 2% e 4% de RC. Os percentuais dos resíduos aplicados na pesquisa foram escolhidos levando-se em consideração as pesquisas de SILVA (2013) e MARQUES (2015), conforme já citado anteriormente. SILVA (2013) encontrou melhores resultados utilizando o percentual de 4% para o RC. MARQUES (2015) obteve resultados melhores com a CBC, utilizando 2%.

Segundo SHERWOOD (1993), o percentual mínimo de aglomerante recomendado para a estabilização química dos solos é 6%, pois abaixo desse valor ocorre somente o melhoramento de algumas propriedades geotécnicas do solo. Na pesquisa o percentual dos aglomerantes obedeceu a essas orientações, sendo adotados percentuais de 6% e no máximo de 12%, conforme as prescrições da ABCP, nas composições solo-aglomerante (s) com CBC e RC.

A Tabela 2 apresenta a nomenclatura das misturas solo-aglomerante(s) e solo-aglomerante(s) com CBC e RC, que foram aplicadas na moldagem dos tijolos maciços. Foram moldadas 11 composições. O valor (%) da umidade ótima do solo, obtido no ensaio de compactação, foi utilizado como base para determinação do percentual de água utilizado na moldagem das composições.

Tabela 2 - Nomenclatura das composições

<b>NOMENCLATURA</b>	<b>DENOMINAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES</b>
S12C	Solo+12% Cimento
S12CH	Solo+12% Cal
S12C2CBC	Solo+12% Cimento+2%CBC
S12C4RC	Solo+12% Cimento+4% RC
S12C2CBC2RC	Solo+12% Cimento+2% CBC+2% RC
S12CH4RC	Solo+12% Cal+4% RC
S12CH2CBC	Solo+12% Cal+ 2%CBC
S12CH2CBC2RC	Solo+12% Cal+2% CBC+2% RC
S6C6CH	Solo+6% Cimento+6% Cal
S6C6CH4RC	Solo+6% Cimento+6%Cal+4% RC
S6C6CH2CBC	Solo+6% Cimento+6%Cal+2% CBC

Fonte: Autor.

#### **4.2.2 Caracterização das matérias-primas**

A caracterização das matérias-primas utilizadas foi realizada através das seguintes técnicas (ensaios): análise granulométrica, limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade), compactação, massa específica, análise mineralógica por difração de raios X (DRX) e análise química por fluorescência de raios X (FRX). Também foi realizado o teste de retração.

##### **a. Análise granulométrica**

As análises granulométricas do solo, do RC e da CBC foram realizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN, de acordo com a NBR 7181/2018. Antes de ser ensaiado, o solo foi seco ao ar, quarteado (através do quarteador de amostras) e destorroado. O RC, após coletado, foi fragmentado através do moinho de bolas, sendo em seguida peneirado na # 200 (0,075mm). A CBC foi peneirada em uma granulometria próxima à dos aglomerantes (próxima a # 200).

##### **b. Limites de Atterberg (LL e LP)**

Os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) foram realizados de acordo com a NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente. Foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN. As amostras utilizadas nos ensaios foram peneiradas na # 40.

##### **c. Massa específica das partículas do solo e do RC**

O ensaio tem por objetivo determinar a massa específica das partículas do solo e do RC, relacionando a massa com o volume dos sólidos. A determinação da massa específica do solo e do RC foi realizada conforme a NBR 6458/2016, utilizando os grãos do solo que passam na # 4 (4,8mm).

##### **d. Teste de retração**

O teste de retração, sugerido pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do estado da Bahia (CEPED, 1984) avalia as características de expansão, contração e plasticidade do solo. Após ser seco e destorroado, o solo foi submetido a esse teste sugerido pelo CEPED. O teste consiste em tomar-se uma porção de solo, adicionando água aos poucos até que a mistura comece a grudar

na lâmina (da colher de pedreiro). Em seguida a mistura é colocada na caixa (Figura 13), e alisada até a altura da mesma. Após esse procedimento, a caixa é deixada, protegida do sol e da chuva, por sete dias. Passado esse período é medida a retração linear.

O objetivo desse teste é 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.

Figura 13: Teste de retração



Fonte: Autor

### **e. Compactação**

A compactação é um método de estabilização de solos que ocorre através da aplicação de uma energia de impacto, aumentando o peso específico do solo e conseqüentemente diminuindo seu índice de vazios. A compactação do solo é imprescindível porque está relacionada ao aumento da sua resistência mecânica, redução da sua porosidade e da absorção de água. A partir da realização desse ensaio é possível correlacionar as variáveis como peso específico seco máximo e umidade ótima de compactação, que serão aplicadas na moldagem dos tijolos maciços. Foi realizado o ensaio normal de compactação (proctor normal), seguindo as orientações estabelecidas pela NBR 7182/2016.

#### **f. Análise por difração de raios X (DRX)**

A difração de raios X (DRX) é o método mais abrangente para determinar a mineralogia das matérias-primas devida não só à possibilidade da identificação das espécies minerais presentes, mas também por permitir estudar as características cristalográficas desses minerais (MARQUES, 2015). Também é possível, pelo DRX, analisar a microestrutura dos materiais por meio de informações sobre orientação e tamanho dos cristais, parâmetros de rede, tensões internas, identificação de fases, entre outras possibilidades. As amostras utilizadas no ensaio de DRX foram peneiradas na # 200 (0,075mm), secas e analisadas através do aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K $\alpha$  e ângulo de varredura ( $2\theta$ ) de 0° a 80°, para a identificação das fases mineralógicas das mesmas.

#### **g. Análise química por fluorescência de raios X (FRX)**

O FRX é o método mais usual para determinação da composição química dos materiais, sendo uma técnica instrumental muito reprodutível, rápida e precisa (BARBA, 1997). Todas as amostras analisadas através do FRX foram peneiradas através da # 200 (0,075mm) e secas em estufa (105° - 110° C) por 24 horas. O FRX foi realizado através do aparelho Shimadzu EDX-700.

#### **h. Análise térmica**

A análise térmica é utilizada para complementação dos ensaios de caracterização de matérias-primas. As principais técnicas termoanalíticas utilizadas em materiais são: Análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (ADT). Na TG, a curva termogravimétrica revela as modificações de massa que ocorrem durante o aquecimento de um material e que podem ter duas causas: decomposição ou oxidação. A TG fornece informações mais restritas que a ADT, no entanto, para análises quantitativas de certas substâncias as informações obtidas podem ser mais precisas (MARQUES, 2015).

Na pesquisa foi realizada a Análise Termogravimétrica (TG). As amostras analisadas foram preparadas através da # 200 (0,075 mm), utilizando-se o material passante nesta peneira. A TG foi realizada somente com a CBC pelo fato da CBC ser um resíduo orgânico, e isso poderia ocasionar uma perda de

massa mais acentuada. A CBC não foi sinterizada durante sua utilização na pesquisa.

#### **i. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Através da análise de imagens obtidas pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi realizado o estudo da caracterização da morfologia do solo, das composições solo-aglomerante(s) com CBC e RC, como também da superfície de fratura das amostras de tijolos submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples. As amostras selecionadas para realização dos ensaios foram analisadas através do microscópio eletrônico de varredura de bancada, da marca Hitachi TM- 3000.

#### **4.2.3. Ensaio tecnológicos (físicos e mecânicos)**

Para cada composição proposta na pesquisa foram prensados 09 (nove) tijolos maciços (para cada idade), sendo 03 (três) para o ensaio de RCS, 03 (três) para o ensaio de absorção de água e 03 (três) para o ensaio de durabilidade modificada. As misturas das composições foram realizadas mecanicamente utilizando-se da betoneira Motomil-MB-150L. Os tijolos maciços foram produzidos através de 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. Após a moldagem e pesagem, os tijolos foram levados à cura durante o período de 07, 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%.

#### **a. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)**

Os ensaios de resistência à compressão simples dos tijolos maciços foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN. Foi utilizada a máquina universal AMSLER com célula de carga de 10.000 kg. Os ensaios foram realizados, após a moldagem dos tijolos, aos 07, 56, 90, 120, 150 e 180 dias, conforme a NBR 8492/2012.

Os valores das resistências individuais obtidas durante o ensaio de RCS para os tijolos maciços foram determinadas conforme a equação (8):

$$R_t = Q/A_t \quad (8)$$

Onde:



Rt = resistência à compressão simples dos tijolos maciços;

Q = carga aplicada (kgf);

At = C x L, área dos tijolos maciços (cm<sup>2</sup>);

C = comprimento do tijolo maciço;

L = largura do tijolo maciço.

### **b. Ensaio de absorção de água**

O ensaio de absorção de água foi realizado aos 7 dias após a cura, conforme as recomendações da NBR 8492/2012. Durante a realização do ensaio, os tijolos maciços foram pesados e em seguida colocados em estufa retilínea, à temperatura de 105<sup>o</sup>/110<sup>o</sup>, até atingirem constância de massa (geralmente no período de 24h). Após atingirem constância de massa, os tijolos foram novamente pesados e colocados em imersão por um período de 24 horas consecutivas; passado esse período, os tijolos foram retirados da imersão e pesados.

Com os dados obtidos nos ciclos de pesagem, secagem e imersão em água, foi calculado o percentual de absorção de água dos tijolos maciços prensados. A absorção de água (AA) dos tijolos, em valores individuais, expressa em porcentagem (%), foi obtida pela equação (9). O valor percentual médio da absorção foi determinado através da média aritmética de três repetições.

$$AA=(M_2-M_1)\times 100/M_1 \quad (9)$$

Onde:

M<sub>1</sub> = massa do corpo de prova seco em estufa (g);

M<sub>2</sub> = massa do corpo de prova saturado (g);

AA = absorção de Água (%);

### **c. Ensaio de durabilidade modificada**

Pesquisas têm sido realizadas visando mensurar a durabilidade dos materiais alternativos com diferentes formas de avaliação e utilização. Como não existe um modelo ou metodologia padrão para realização de estudo da durabilidade, os resultados dos estudos científicos mais recentes indicam diretrizes a serem seguidas e metas a serem alcançadas, por isso justificam-se as várias técnicas adotadas para determinação da durabilidade, bem como a

variabilidade dos resultados obtidos pelos pesquisadores (FARIAS FILHO, 2007 apud SILVA, 2013).

Na pesquisa, o ensaio de durabilidade modificada foi aplicado nas composições dos tijolos e foi adaptado aos preceitos previstos no método de ensaio DNER-ME 203/94. Foram realizados 12 (doze) ciclos de secagem em estufa, e posterior imersão em água, sem necessidade de escovação dos tijolos. Autores como GRANDE 2003; LIMA et al., 2006 apud SILVA, 2013, justificam que as solicitações de abrasão superficial a que são submetidos os tijolos nas obras de construção civil são menos rigorosas que as constatadas nas utilizadas para fins rodoviários, não sendo necessária, portanto a etapa de escovação.

Para a determinação da perda de massa foi aplicado os preceitos do ensaio de durabilidade modificada. Aos 28 dias de cura, os tijolos 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 dessa maneira, a massa inicial seca e a massa úmida. Este procedimento concluiu o primeiro ciclo de 48 horas. Ao término do primeiro ciclo os tijolos maciços foram secos por 42 horas em estufa, pesados e depois imersos em água durante 6 horas. Em seguida foram retirados e pesados completando, assim, o segundo ciclo de 48 horas. Esse procedimento experimental foi repetido por 10(dez) vezes. Ao final do ensaio foram realizados 12 ciclos de 48 horas, entre secagens e molhagens. Após o último ciclo, os tijolos maciços foram secos em estufa a 105°C por 24horas e pesados, determinando-se a massa final seca. A determinação da perda de massa dos tijolos maciços foi determinada através da equação (10).

$$P_m = (M_i - M_f) \times 100 / M_f \quad (10)$$

Onde:

$P_m$  = Percentagem de perda de massa dos tijolos maciços;

$M_i$  = Massa seca inicial dos tijolos maciços;

$M_f$  = Massa seca final dos tijolos maciços.

#### **4.2.4 Análise química e mineralógica das matérias-primas**

As determinações da composição química e das fases mineralógicas presentes nas matérias-primas utilizadas na pesquisa (solo, cimento, cal, CBC e RC), foram realizadas, respectivamente, através dos ensaios de caracterização de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). O FRX foi realizado através do aparelho Shimadzu EDX-700 e o DRX através do aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K $\alpha$  e ângulo de varredura ( $2\theta$ ) de 0° a 80°.

#### **4.2.5 Análise mineralógica das composições solo-aglomerante(s) com CBC e RC**

Amostras mais significativas (com melhores resultados no ensaio de RCS) das formulações solo-aglomerante(s) com CBC e RC, provenientes dos tijolos maciços rompidos aos 56 dias, foram submetidas a ensaios de DRX, utilizando-se para isso o aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K $\alpha$  e ângulo de varredura ( $2\theta$ ) de 0° a 80°, para a identificação das fases mineralógicas das mesmas. As amostras selecionadas para realização dos ensaios foram anteriormente 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. Essa preparação é chamada de método de preparação das amostras para porosimetria por intrusão de mercúrio, sendo recomendada por DUART (2008). A finalidade desse procedimento é retirar a água livre presente nas amostras das misturas de solo-aglomerante e induzir a paralisação das reações de hidratação (cimentícias e pozolânicas), evitando a alteração da microestrutura do material. É recomendada a realização desse procedimento quando da impossibilidade da realização imediata dos ensaios de análise mineralógica com as composições desejadas.

#### **4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Amostras de tijolos, das composições solo-aglomerantes(s) com CBC, e com RC, foram retiradas após a realização do ensaio de resistência à compressão simples aos 56 e 180 dias, para estudo de caracterização da

superfície de fratura através da técnica de MEV. As amostras retiradas foram as que obtiveram valores mais significativos no ensaio de RCS.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS MATERIAIS

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 nas Tabelas 3, 4, 5, 6 e 7, e nas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18.

Analisando os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 3, verifica-se que o solo apresenta aproximadamente 88% da sua composição química total composta de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), indicando uma forte presença dos minerais quartzo e caulinita, comprovado no ensaio de DRX, conforme indica a Figura 14.

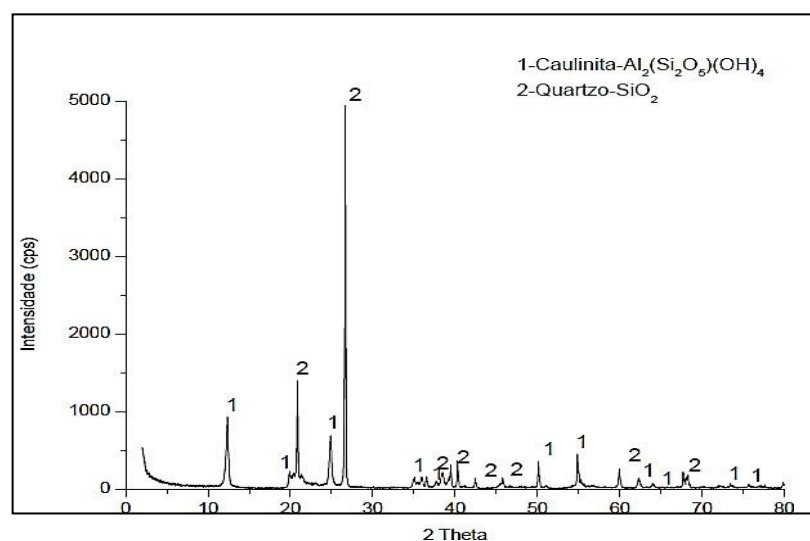
Tabela 3 - Composição química do solo (%)

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CuO}$	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	$\text{ZrO}_2$	$\text{V}_2\text{O}_5$
<b>52,2</b>	<b>36,0</b>	1,91	0,49	0,25	0,02	0,05	0,02	0,68	0,09	0,04

Fonte: Autor

O DRX do solo apresentou as fases mineralógicas caulinita e quartzo corroborando com o resultado do FRX. A fase predominante apresentada no DRX, foi quartzo, devido a maior presença de silte e areia na constituição total do solo.

Figura 14: DRX do solo



Fonte: Autor

A Cal, conforme mostra a Tabela 4, tem um alto percentual de óxido de cálcio (CaO), aproximadamente 88%, e um valor de óxido de magnésio (MgO) da ordem aproximada de 6%, comprovados no ensaio de DRX. Com base nesses índices, a cal foi classificada como cálcica, tipo CH-II, como dispõe a NBR 7175/2003.

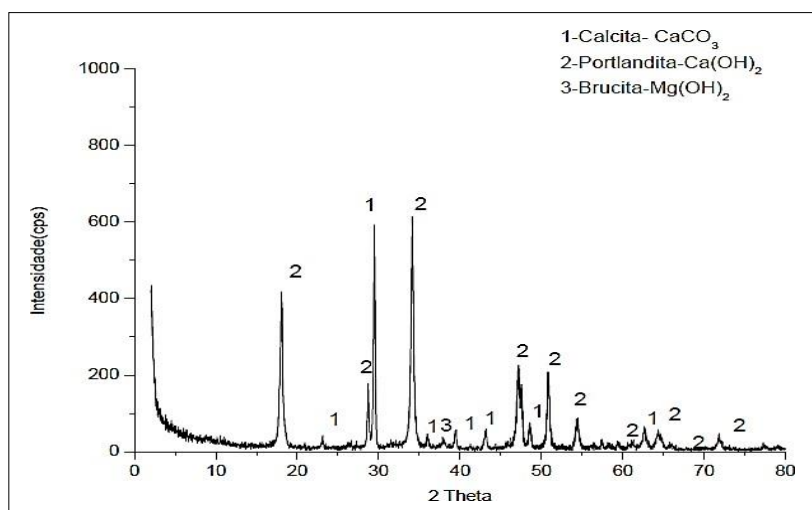
Tabela 4 - Composição química da cal (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	SnO <sub>2</sub>	SrO	SO <sub>3</sub>
2,31	0,75	0,47	6,43	88,3	0,12	0,74	0,54	0,34

Fonte: Autor

As fases mineralógicas presentes na cal são calcita, portlandita e brucita, conforme apresentado na Figura 15, corroborando com o resultado do FRX.

Figura 15: DRX da cal



Fonte: Autor

A amostra de cimento apresenta um percentual de óxido de cálcio (CaO) de aproximadamente 60%, conforme indicado na Tabela 5, confirmando a adição de filer calcário, sendo um cimento composto.

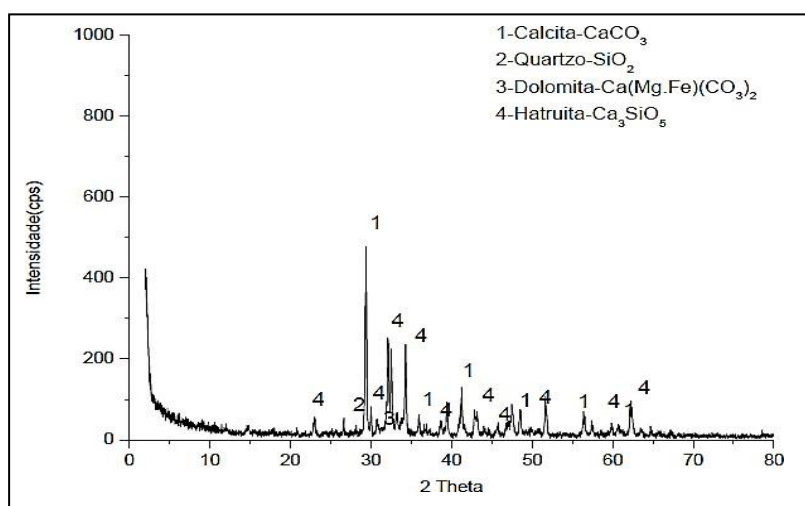
Tabela 5 - Composição química do cimento (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZnO
19,03	4,6	3,22	3,2	60,84	1,22	0,15	0,18	0,19	0,16	0,27	0,01

Fonte: Autor

O DRX do cimento apresentou as fases mineralógicas calcita, dolomita, hatruita e quartzo, conforme mostra a Figura 16, corroborando com o resultado do FRX. O silicato dicálcico ( $C_2S$ ) tem sua identificação dificultada, pela coincidência existente entre os picos de maior intensidade com os do silicato tricálcico (hatruita).

Figura 16: DRX do cimento



Fonte: Autor

A amostra do RC, conforme verificado na Tabela 6, apresenta teores de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro, que somados, representam aproximadamente 89% da composição. Esse valor é superior ao valor mínimo exigido de 70% para a soma dos óxidos citados para materiais pozolânicos da classe N, conforme dispõe a NBR 12653/2014.

Tabela 6 - Composição química do RC (%)

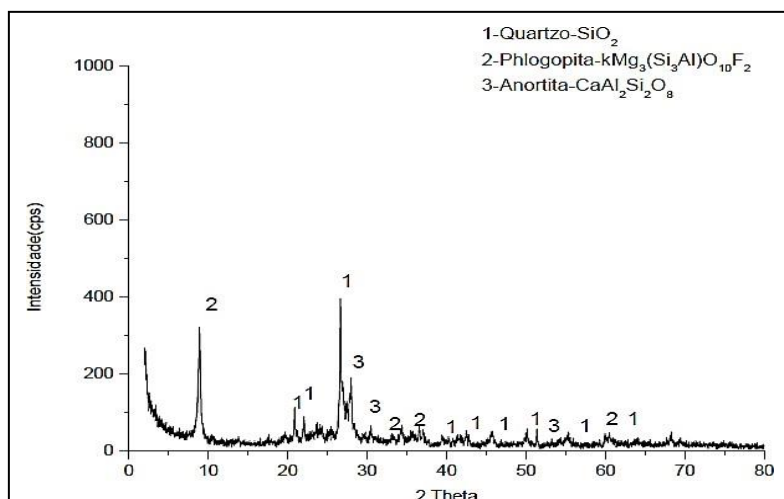
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	SnO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>
<b>45,59</b>	<b>35,69</b>	<b>7,82</b>	4,11	1,46	2,38	0,97	0,07	0,06	0,59	0,94	0,06

Fonte: Autor

O resíduo cerâmico utilizado na pesquisa apresenta um certo grau de pozolanicidade. A Figura 17, apresenta as fases mineralógicas quartzo, phlogopita e anortita, presentes no RC, conforme mostra o ensaio de DRX. As fases apresentadas estão em concordância com os óxidos ou elementos encontrados no ensaio de FRX.



Figura 17: DRX do RC



Fonte: Autor

A CBC utilizada apresenta percentuais de sílica, óxido de cálcio, óxido de ferro e óxido de potássio que totalizam aproximadamente 75% da sua composição, conforme observado na Tabela 7.

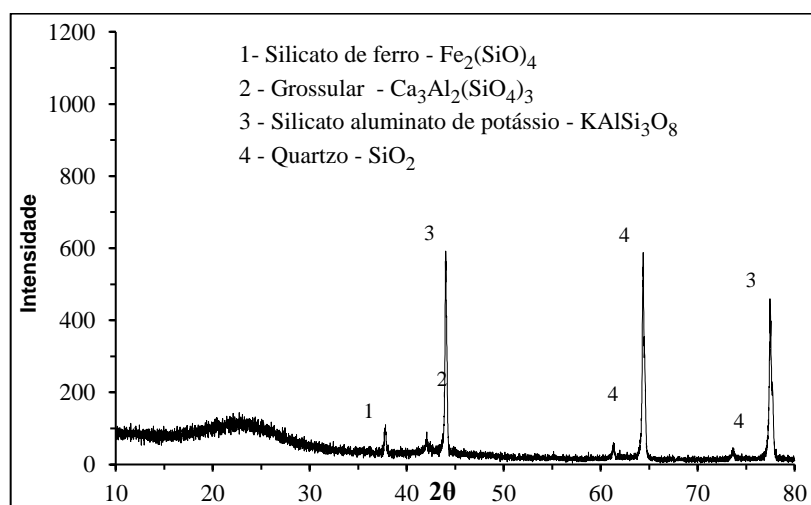
Tabela 7 - Composição química da CBC (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZnO
<b>26,74</b>	3,66	<b>13,48</b>	2,86	<b>19,82</b>	<b>15,27</b>	0,66	0,64	0,58	6,05	6,20	1,16	2,85

Fonte: Autor

A Figura 18, mostra as fases silicato de ferro, grossular ( espécie de cálcio-alumínio, do grupo de minerais granada), silicato aluminato de potássio e quartzo encontradas para a CBC, no ensaio de DRX. As fases mostradas estão concordando com os óxidos ou elementos apresentados no ensaio de FRX.

Figura 18: DRX da CBC.



Fonte: Autor

## 5.2 ANÁLISE TÉRMICA DA CBC

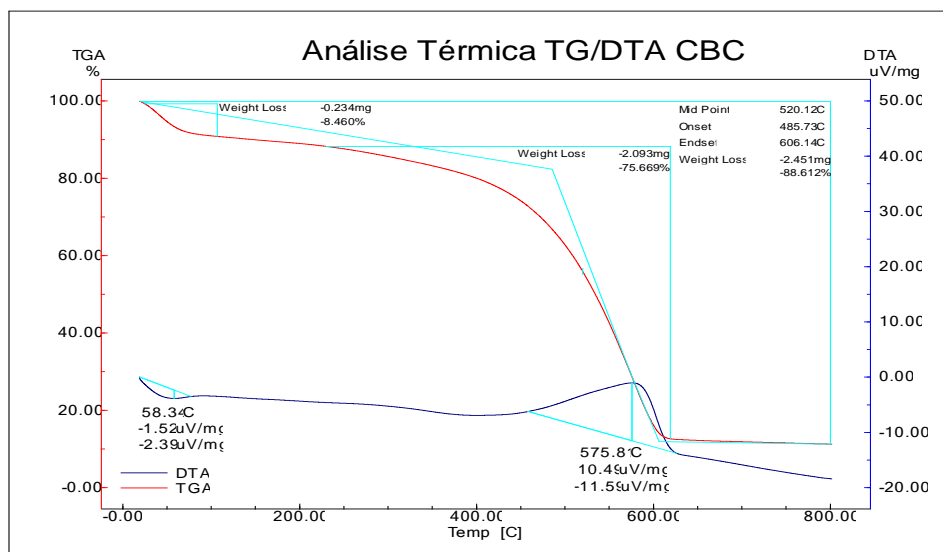
A Figura 19, apresenta a curva termogravimétrica da CBC. O resultado mostrou uma perda de massa inicial significativa. Esse valor elevado de perda de massa, possivelmente, ocorreu devido ao alto teor de umidade apresentado pela CBC. A ação do intemperismo pode ter ocasionado essa elevação na umidade, quando da coleta da mesma. Antes da realização do ensaio, a CBC foi disposta em bandeja para secagem ao ar, porém após o processo ainda apresentou uma umidade considerável.

Segundo BARBOSA e PRABHU (2002), O acúmulo de silício entre a cutícula e a parede das células da epiderme funciona como barreira física a penetração de fungos patogênicos reduzindo a perda de água por transpiração, podendo esse fato ter ocorrido durante a secagem da CBC. Também, o fato das raízes da cana-de-áçúcar absorverem o silício do solo na forma de ácido monossílico ( $\text{H}_2\text{SiO}_4$ ), possivelmente contribuíram para a manutenção da umidade elevada na CBC, mesmo após secagem. Por isso, a ocorrência dessa perda inicial elevada, possivelmente ocorreu pelo fato da CBC apresentar uma umidade acima do esperado após a secagem.

A CBC apresentou percentuais consideráveis de CaO (19,82%) e  $\text{K}_2\text{O}$  (15,27%) e possivelmente este fato contribuiu para a retenção de água na mesma, devido a esses óxidos serem fundentes, principalmente o CaO.

A curva termogravimétrica da CBC, mostra que a mesma apresenta uma certa estabilidade térmica, podendo esse fato ser atribuído ao processo de sinterização para alimentação das caldeiras para co-geração de energia. O ensaio de DRX realizado com a CBC, mostrou a presença de fragmentos de quartzo na amostra, corroborando com os resultados encontrados na análise térmica. Observa-se que na temperatura de aproximadamente 575 °C ocorre a inversão térmica onde o quartzo passa da fase  $\alpha$  para fase  $\beta$ .

Figura 19: Análise térmica da CBC



Fonte: Autor

### 5.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As análises granulométricas do solo, do RC e da CBC, foram realizadas conforme a NBR 7181/2016. As Figuras 20, 21 e 22, mostram as curvas granulométricas do solo, do RC e da CBC, respectivamente.

#### 5.3.1 Análise granulométrica do solo

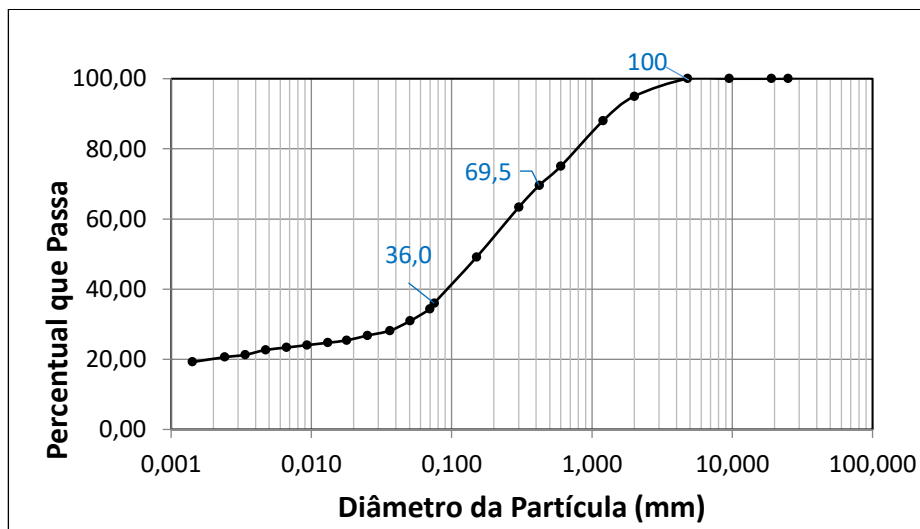
Todos os ensaios realizados com o solo, aqui apresentados, foram feitos com o solo da 2ª coleta, entretanto os resultados dos ensaios realizados com o solo da 1ª coleta, apresentaram valores semelhantes aos realizados com o da 2ª coleta. O solo da 1ª e 2ª coleta é o mesmo, diferenciando apenas a data da coleta. O solo da 1ª coleta foi utilizado em pesquisas anteriores de GÓIS (2012) e SILVA (2013), sendo, portanto, seus resultados já conhecidos.

Conforme a Figura 20, o solo apresentou um percentual de 100% passando na # 4 (4,8mm), 69,5% passando na # 40 (0,42mm) e 36,0% passando na # 200 (0,075mm). Os valores encontrados revelam que o solo utilizado atende aos parâmetros estabelecidos pela ABCP para misturas de solo-cimento, ou seja,

- 100% das partículas passando na # 4
- 15 a 100% das partículas passando na # 40
- 10 a 50% das partículas passando na # 200.

O solo utilizado também atende aos critérios estabelecidos pela NBR 10833/2013 para produção de tijolos maciços de solo-cimento, não necessitando de correção granulométrica.

Figura 20: Curva de distribuição granulométrica do solo.

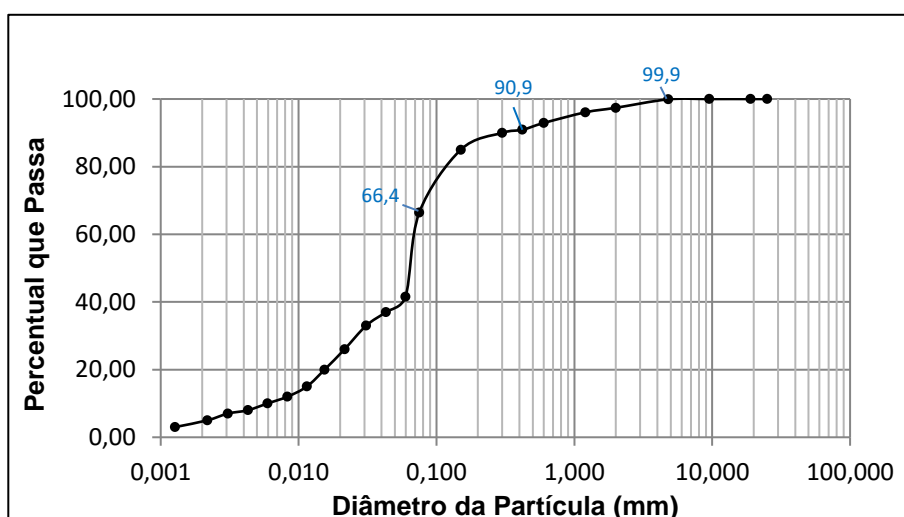


Fonte: Autor

### 5.3.2 Análise granulométrica do resíduo cerâmico

O RC apresentou percentuais de 99,9%, 90,9% e 66,4% passando nas peneiras N° 4 (4,8mm), N° 40 (0,42mm) e N° 200 (0,075mm), respectivamente, Figura 21.

Figura 21: Curva de distribuição granulométrica do RC.



Fonte: Autor

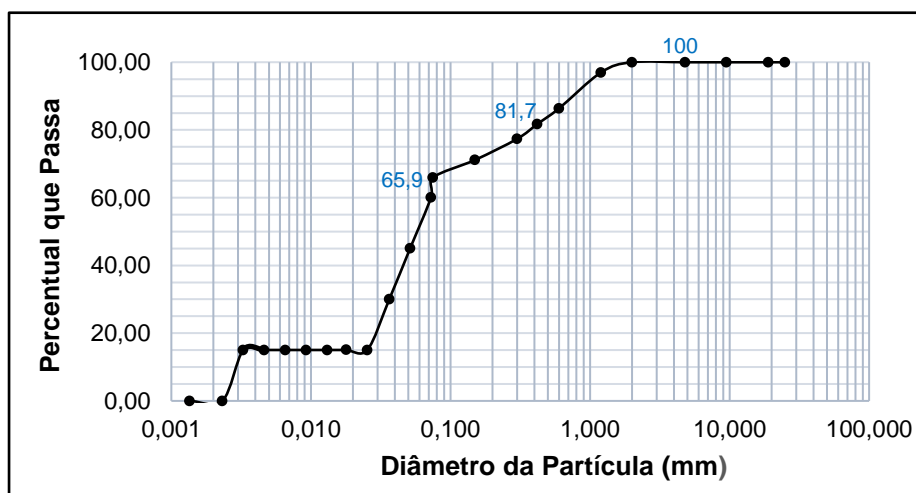
A NBR 12653/2014 dispõe que quanto menor o diâmetro das partículas, maior será a superfície específica e o grau de reatividade com o hidróxido de cálcio na presença da água. Os percentuais de 2% e 4% de RC incorporados à

fração fina do solo atenderam aos limites prescritos pela NBR 10833/2013, ou seja, entre 10% e 50 % da formulação solo-RC passou na peneira nº 200 (0,075mm).

### 5.3.3 Análise granulométrica da CBC

De acordo com a Figura 22, 50% do volume passante das partículas da CBC apresentam diâmetro inferior a 0,06 mm. A CBC apresenta percentuais de 100%, 81,7% e 65,9% passando nas peneiras N° 4 (4,8mm), N° 40 (0,42mm) e N° 200 (0,075mm), respectivamente. Segundo pesquisas realizadas na literatura, quanto menor o diâmetro das partículas, maior a possibilidade da ocorrência de atividade química das mesmas quando em contato com o cimento e/ou cal, em presença de água. Mais de 65% das partículas da CBC utilizada passaram na # 200 (0,075mm), possibilitando uma maior ocorrência da atividade pozolânica quando adicionada ao aglomerante, em presença de água.

Figura 22: Curva de distribuição granulométrica da CBC



Fonte: Autor

A curva granulométrica da CBC apresentou um trecho quase em linha reta (trecho próximo ao valor de 18%), podendo esse fato ter sido ocasionado por uma ausência de partículas nessa faixa de diâmetro. A análise foi repetida duas vezes não ocorrendo mudanças significativas na curva.

### 5.4 LIMITES DE ATTERBERG E MASSA ESPECÍFICA

A Tabela 8 apresenta os valores encontrados, para o solo, solo+RC, solo+CBC e solo+RC+CBC, dos limites de Atterberg (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade).

Tabela 8 - Limites de Atterberg do solo e RC

LIMITES DE ATTERBERG/	SOLO	SOLO +2%RC	SOLO +4%RC	SOLO +2%CBC	SOLO +2%RC +2%CBC
LIMITE DE LIQUIDEZ	25,3%	28,6%	29,5%	25,5%	26,8%
LIMITE DE PLASTICIDADE	18,1%	17,8%	18,0%	17,7%	17,9%
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	7,2%	10,8%	11,5%	7,8%	8,9%

Fonte: Autor.

Analisando os resultados encontrados nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade e tomando-se como referência CAPUTO, 2011, o solo é classificado como medianamente plástico, ou seja,  $7 < IP < 15$ . O solo foi classificado como A-4, de acordo com a classificação adotada pelo sistema HRB.

A NBR 10833/2013 estabelece o limite máximo de 45% para o LL e 18% para o IP, logo o solo atende aos parâmetros exigidos por essa Norma, podendo ser utilizado como solo-cimento. Durante a determinação dos índices de Atterberg para as misturas solo-RC, solo-CBC e solo-CBC-RC foram feitos testes experimentais incorporando percentuais do RC, da CBC e da CBC+RC em relação à massa do solo. Os ensaios realizados demonstraram que os intervalos compreendidos entre 2% e 4% de RC, 2% de CBC e 2%RC+2%CBC adicionados a massa do solo, mantiveram os índices de Atterberg em conformidade com o que estabelece a NBR 10833/2013.

Os resultados do limite de plasticidade das misturas solo-resíduos(s), apresentaram valores com pequenos decréscimos comparados ao valor encontrado para o solo. Esses valores encontrados, um pouco abaixo do esperado, possivelmente, ocorreram devido as condições ambientais ou ainda também a possíveis “falhas” ocorridas nos equipamentos utilizados durante a realização da análise (estufa, balança, etc.). O objetivo principal da realização dessa análise, juntamente com o limite de liquidez, do solo e de todas as misturas solo-resíduo(s), era atender as exigências da NBR 10883/2013, sendo esse objetivo atingido.

A Tabela 9 mostra os valores encontrados da massa específica dos sólidos do solo, do RC e da CBC. O solo apresentou um valor no resultado um pouco abaixo do esperado para um solo, entretanto isso não inviabiliza o resultado da

análise. A análise com o solo foi realizada três vezes para confirmação do valor encontrado.

Tabela 9 - Massa específica dos sólidos do solo e RC

<b>MATERIAL</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA</b>
SOLO	2,54 g/cm <sup>3</sup>
RC	2,65 g/cm <sup>3</sup>
CBC	2,85 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor

## 5.5 TESTE DE RETRAÇÃO

Foi realizado a priori, na amostra de solo coletado, o teste de retração (CEPED), não apresentando fendas transversais na parte central da mesma que viessem a ultrapassar o limite de 2,0 cm, e as fissuras apresentadas foram inferiores a 1,0 cm, comprovando a ausência de argila expansiva.

O teste tem o objetivo de 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. O resultado do teste de retração foi comprovado pelo ensaio de FRX que mostrou a presença do mineral caulinita (não expansiva) no solo, confirmando a ausência de argila expansiva no mesmo.

## 5.6 COMPACTAÇÃO

O valor do peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima do solo estão apresentados na Tabela 10 a seguir. A mesma Tabela mostra também, os valores do peso específico seco máximo e da umidade ótima de algumas composições de solo-aglomerante(s) utilizadas na pesquisa. A compactação foi realizada pelo ensaio de Proctor normal.

Tabela 10 - Peso específico aparente máximo e umidade ótima

<b>COMPOSIÇÕES</b>	<b><math>\gamma_{dmax}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>W<sub>ot</sub> (%)</b>
Solo	1,90	13,54
S6C	1,79	15,80
S12C	1,82	14,90
S6CH	1,75	16,25
S12CH	1,70	17,27
S12C2CBC	1,77	14,73
S12C4RC	1,83	14,85

Fonte: AUTOR

Conforme observado na Tabela 10, as composições de solo-cimento apresentaram um aumento médio na umidade, comparando com a umidade ótima do solo. Isso ocorre pelo fato da porção fina do cimento incorporasse ao solo, ocasionando um aumento médio na superfície específica das partículas presentes na mistura solo-cimento, aumentando o percentual de água necessária para agregação das partículas inertes do solo. Nas composições de solo-cimento, apresentadas na Tabela 10, observa-se uma pequena redução nos valores do peso específico em relação ao valor encontrado para o solo.

As composições de solo-cal, mostradas na Tabela 10, apresentaram um aumento nos valores da umidade ótima e uma redução nos valores do peso específico, quando comparados aos valores encontrados para o solo. Esse fenômeno pode estar relacionado a maior solubilidade do hidróxido de cálcio, bem como a floculação das partículas do solo, quando existe cal na mistura.

A composição de solo-cimento-RC, apresentada na Tabela 10, mostra um valor na umidade ótima um pouco maior em relação a umidade obtida pelo solo. Esse aumento no teor de umidade ótima é consequência da incorporação da porção fina do aglomerante (cimento) e do RC, ocorrendo um aumento na superfície específica das partículas presentes na composição e uma demanda maior de água nas etapas de moldagem e compactação. O acréscimo de água ocorrido durante o ensaio de compactação, para obtenção da umidade ótima, contribui para o aumento dos vazios da mistura solo-aglomerante (s) e RC, ocorrendo também a diminuição do peso específico seco máximo.

A composição de solo-cimento-CBC (S12C2CBC), conforme mostra a Tabela 10, apresenta um valor na umidade ótima maior quando comparado ao valor encontrado para o solo, consequência da adição da porção fina do cimento e da CBC.

## **5.7 ENSAIOS TECNOLÓGICOS**

### **5.7.1 Resistência à compressão simples dos tijolos maciços**

Os tijolos maciços de solo-aglomerante(s) com CBC e/ou RC foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples (RCS), realizado conforme dispõe a NBR 8492/2012 e a NBR 13553/2012. A Tabela 11 e as Figuras 23, 24 e 25, a seguir, apresentam os resultados obtidos (valores médios, relativos a três tijolos para cada idade) para a RCS das composições formuladas na



pesquisa para os tijolos. Os respectivos desvios padrões das composições, também são apresentados na Tabela 11.

SILVA (2013) estudou o comportamento de tijolos maciços de solo-aglomerantes e RC produzidos a partir de variadas formulações e verificou que os melhores resultados foram obtidos para aquelas cujo teor de aglomerante se aproximava de 12% e o teor de RC, de 4%. Dessa forma, é possível verificar a influência dos tipos e teores de aglomerantes, bem como do RC, sobre o comportamento dos tijolos (FONSÊCA, 2018). Já para MARQUES (2015), a utilização do percentual de 2% para a CBC, em substituição ao cimento, proporcionou resultados mais promissores.

Tabela 11- Resistência à compressão simples das composições dos tijolos (valores médios).

COMPOSIÇÕES	Resistência à compressão simples (MPa)					
	07 Dias	56 Dias	90 Dias	120 Dias	150 Dias	180 Dias
S12CH	0,73±0,01	0,80±0,06	1,33±0,27	1,89±0,07	2,07±0,46	2,51±0,41
<b>S12CH4RC</b>	0,85±0,41	0,97±0,34	1,41±0,08	1,96±0,34	2,11±0,53	2,73±0,17
<b>S12CH2CBC</b>	0,63±0,24	0,81±0,21	1,38±0,09	1,94±0,28	2,15±0,63	2,55±0,05
<b>S12CH2CBC2RC</b>	0,92±0,19	1,49±0,16	1,72±0,43	2,0±0,37	2,20±0,17	2,75±0,13
<b>S6C6CH</b>	1,21±0,19	1,45±0,15	1,63±0,34	2,01±0,01	2,18±0,04	2,81±0,10
<b>S6C6CH4RC</b>	1,22±0,24	1,49±0,32	1,87±0,47	2,05±0,26	2,32±0,08	3,15±0,18
<b>S6C6CH2CBC</b>	0,98±0,35	1,47±0,27	1,95±0,55	2,05±0,32	2,25±0,11	3,03±0,09
S12C	0,98±0,24	2,36±0,21	2,85±0,19	3,02±0,05	3,12±0,25	3,18±0,35
<b>S12C4RC</b>	1,11±0,44	2,69±0,37	2,95±0,25	3,08±0,10	3,21±0,14	3,52±0,59
<b>S12C2CBC</b>	1,65±0,17	2,91±0,19	3,15±0,15	3,55±0,25	3,95±0,24	4,44±0,68
<b>S12C2CBC2RC</b>	2,15±0,59	2,55 ±0,37	2,91±0,12	3,18±0,31	4,27±0,21	5,57±0,25

Fonte: Autor

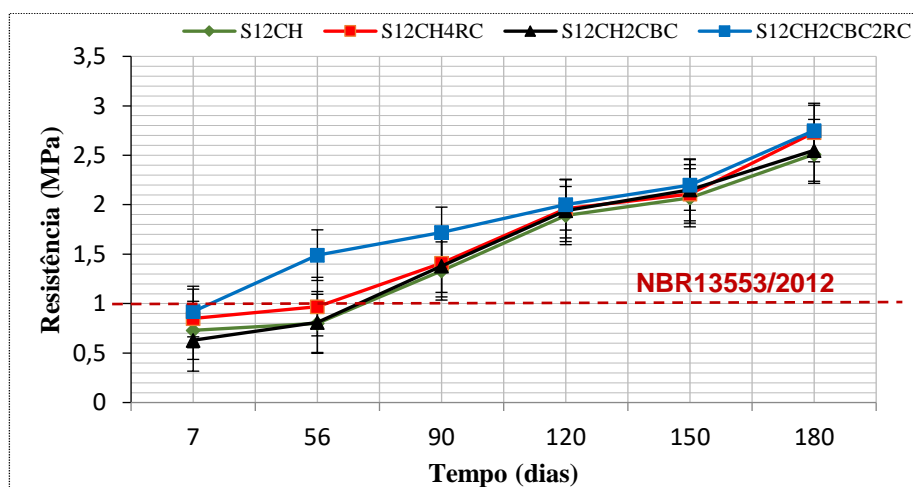
De modo geral, conforme apresentado na Tabela 11 e nas Figuras 23, 24 e 25, verifica-se que incorporando, nas composições com cimento e/ou cal, o RC e/ou o CBC, nos percentuais especificados, os valores da RCS dos tijolos elevaram-se, quando comparados aos das composições moldadas sem a adição do RC e/ou CBC. Isso é explicado pelo efeito microfiller de colmatação dos poros ocasionado pela fração fina que provém dos resíduos e também possivelmente pela produção dos silicatos hidratados, através das reações pozolânicas.

A Figura 23, mostra os valores da RCS encontrados para os tijolos moldados utilizando-se o aglomerante cal. A NBR 13553/2012, estabelece o valor

mínimo de 1 MPa para tijolos de vedação, para uso sem fins estruturais. Observa-se pela Figura, que para todas as composições ( excetuando-se a composição S12CH2CBC2RC), somente a partir de 90 dias esse valor de 1 MPa foi alcançado, esse fenômeno pode estar relacionado ao elevado teor de hidróxido de cálcio presente na mistura exigir um tempo maior de cura para que os mecanismos envolvidos na reação pozolânica sejam concretizados. 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 (SILVA, 2013).

Observa-se ainda, Figura 23, que quando foram adicionados a CBC e o RC à mistura solo-cal (composição S12CH2CBC2RC), a RCS alcançou os maiores valores para essa mistura. Isso pode ser explicado pelo fato do efeito microfiller ter proporcionado, pela adição conjunta do RC e da CBC à mistura, a possibilidade da recombinação dos elevados teores de sílica existentes nos resíduos com a fase portlandita, formando silicatos de cálcio hidratados.

Figura 23: RCS dos tijolos moldados com cal e resíduos.

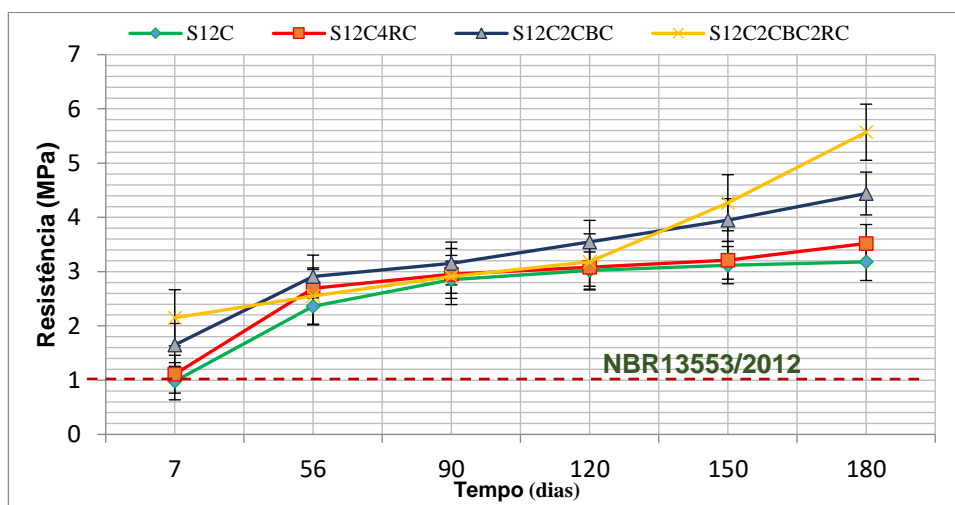


Fonte: Autor

A Figura 24, apresenta as composições dos tijolos moldados utilizando-se somente o cimento como aglomerante. Percebe-se pela Figura 24, que para todas as composições, foi alcançado o valor mínimo da RCS exigido pela NBR 13553/2012 (1 MPa), já a partir dos 7 dias, para tijolos sem fins estruturais. Essas composições apresentaram maiores resultados na RCS quando comparados com as moldadas somente com cal (Figura 23). Os resultados comprovam a ação dos silicatos de cálcio  $C_2S$  e  $C_3S$ , a partir da hidratação dos mesmos, aumentando a resistência mecânica das composições estudadas ao longo do período da cura.

Quando comparadas as composições dos tijolos moldados com cimento e CBC com as moldadas com cimento e RC, Figura 24, percebe-se que nas composições com cimento e CBC foram constatados valores superiores na RCS. Esse fato pode ser explicado pela possível ocorrência de uma prensagem mais eficiente durante a moldagem dos tijolos nos quais a CBC foi adicionada e também pela possibilidade da fração do solo utilizado ter possivelmente apresentado mais argilominerais ou ainda que a CBC tenha apresentado uma interação melhor na mistura durante a moldagem dos tijolos.

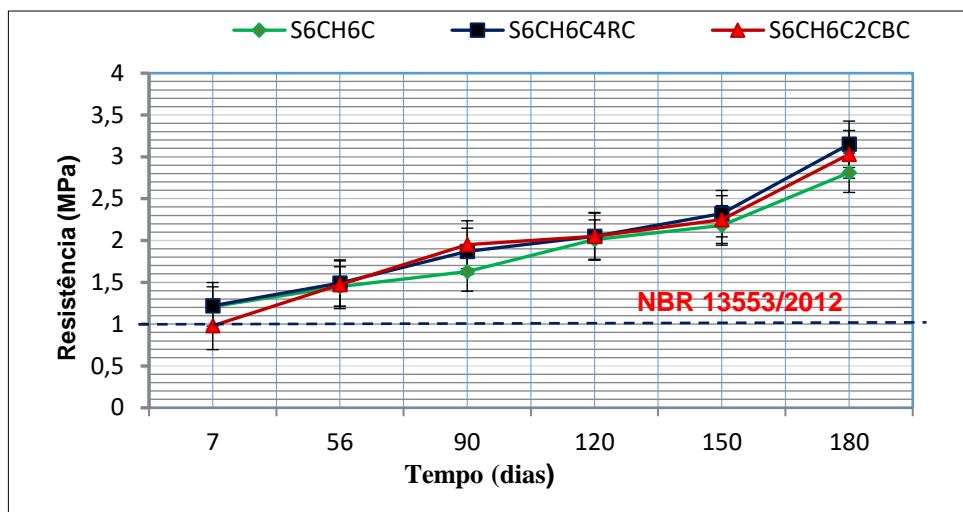
Figura 24: RCS dos tijolos moldados com cimento e resíduos.



Fonte: Autor

A Figura 25, apresenta as composições dos tijolos moldados com os aglomerantes, cimento e cal, adicionados ao RC ou a CBC. Analisando os resultados mostrados na Figura 25, percebe-se um pequeno aumento no valor da RCS para as composições na qual o RC foi adicionado a mistura, comparados com os valores das composições nas quais a CBC foi incorporada. Isso pode ser explicado pelo fato do RC apresentar possivelmente uma maior atividade pozolânica. Devido aos significativos teores de sílica e alumina existentes na sua microestrutura, as composições nas quais a CBC foi adicionada, Figura 25, apresentam valores superiores quando comparados com os valores obtidos pelas composições sem nenhum resíduo, ou seja, com solo, cal e cimento. Isso pode estar relacionado ao refinamento dos poros proporcionado pelas partículas da CBC na matriz solo-aglomerantes e água, com uma possível reação pozolânica da adição da CBC.

Figura 25: RCS dos tijolos moldados com cal, cimento e resíduos.



Fonte: Autor

### 5.7.2 Absorção de água dos tijolos maciços

Aos 7 dias após a cura, os tijolos foram submetidos aos ensaios de absorção de água. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 8491/2012 e NBR 8492/2012. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 12 e nas Figuras 26, 27 e 28 a seguir.

Tabela 12 - Absorção das composições dos tijolos.

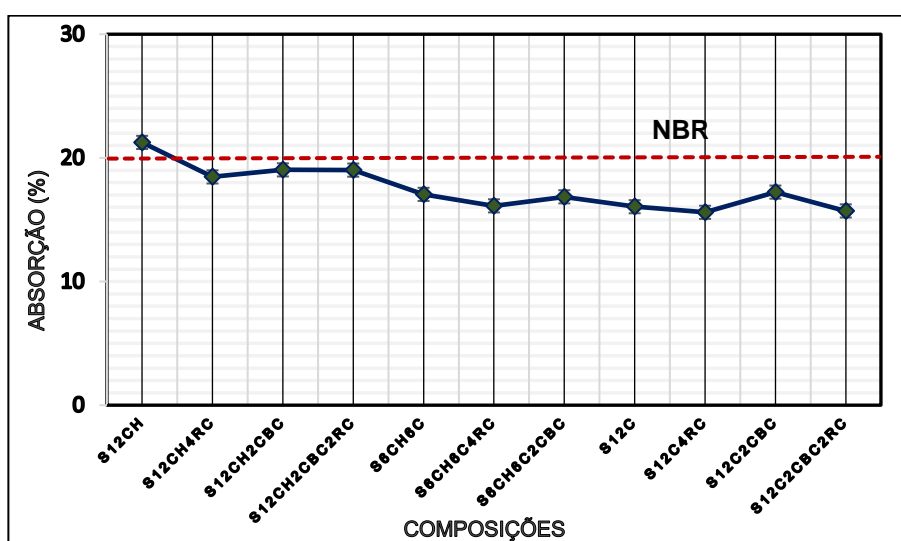
COMPOSIÇÕES	ABSORÇÃO (%)
S12CH	21,45 ± 0,32
S12CH4RC	18,46 ± 0,27
S12CH2CBC	19,03 ± 0,25
S12CH2CBC2RC	19,01 ± 0,18
S6CH6C	17,05 ± 0,16
S6CH6C4RC	16,12 ± 0,14
S6CH6C2CBC	16,85 ± 0,35
S12C	16,05 ± 0,26
S12C4RC	15,60 ± 0,29
S12C2CBC	17,23 ± 0,10
S12C2CBC2RC	15,71 ± 0,28

Fonte: Autor

De uma maneira geral, conforme apresentado na Tabela 12 e Figura 26, todas as composições dos tijolos moldados, com exceção da S12CH, apresentaram índice de absorção inferior ao máximo recomendado pela NBR 8491/2012. A linha tracejada representa na Figura 26, o valor limite do índice de

absorção que a NBR 8491/ 2012 recomenda. As composições nas quais o RC e a CBC foram incorporados, proporcionaram uma redução significativa nos teores de absorção, principalmente naquelas produzidas apenas com o aglomerante cimento. Esse fenômeno pode estar relacionado ao efeito de refinamento dos poros existentes na microestrutura, devido a adição do RC e da CBC, tornando-as mais densas. Percebe-se, Figura 26, que a composição S12C4RC, apresentou o menor valor para o índice de Absorção entre todas as demais. Fato que pode ser explicado pela ocorrência do efeito microfiller e pela ocorrência de possíveis reações pozolânicas ao longo do tempo, causado pelo RC.

Figura 26: Absorção dos tijolos moldados



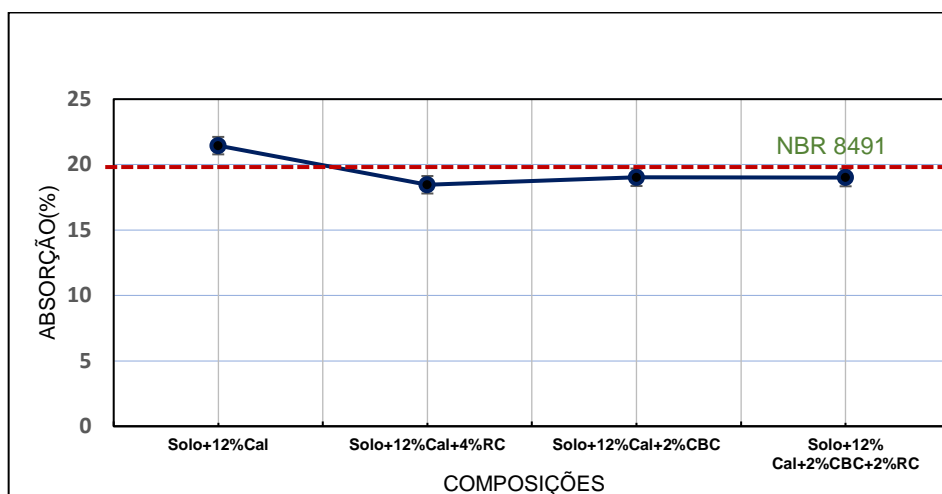
Fonte: Autor

A Figura 27, a seguir, apresenta o resultado da Absorção de água dos tijolos moldados com solo, cal, adicionado o RC e/ou CBC. A composição do tijolo moldado sem a adição de resíduos, apresentou um índice de Absorção de água superior a 20%, não atendendo a recomendação da NBR 8491/2012. Quando foi adicionado o RC e a CBC, ou ambos conjuntamente, nas composições percebeu-se uma diminuição no índice de AA. Essa diminuição nos valores da Absorção pode ser explicado através da ocorrência de uma estabilização mecânica, chamada efeito microfiller, ocorrendo o preenchimento dos poros existentes, pelas partículas finas do resíduo, tornando a mistura mais coesa e mais impermeável. Também, os efeitos da pozolanicidade da CBC e do RC, podem estar contribuindo para melhorar a densificação da mistura analisada.

A composição apresentada na Figura 27, na qual foi adicionado somente o RC à mistura (S12CH4RC), apresentou o menor valor para o índice de absorção,

fato que pode ser explicado pelo efeito microfíler e às reações pozolânicas anteriormente citadas.

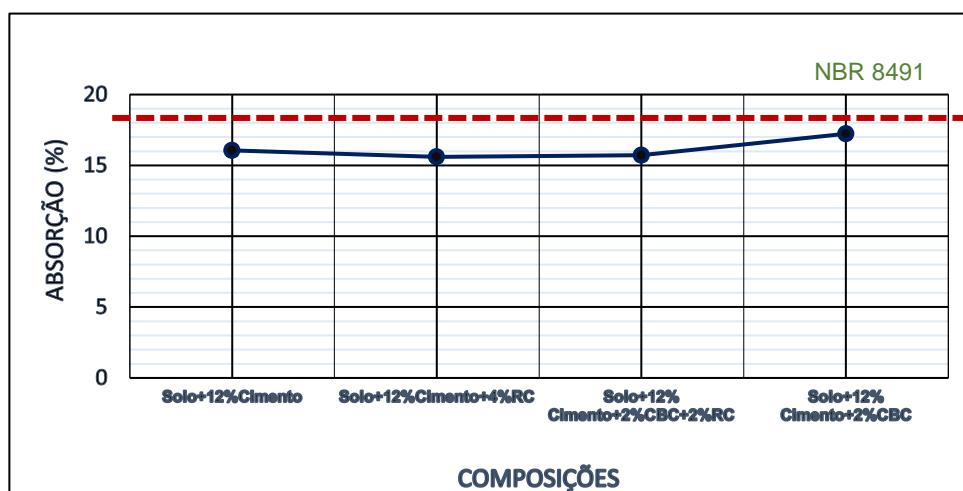
Figura 27: Absorção de água dos tijolos moldados com cal, CBC e RC



Fonte: Autor.

Os índices de Absorção das composições dos tijolos moldados com solo, cimento, adicionando-se o RC e/ou CBC, estão apresentados na Figura 28 a seguir. A composição na qual adicionou-se 4% do RC (S12C4RC), apresentou o menor valor para o índice de Absorção de água. As reações pozolânicas advindas da incorporação do RC podem estar contribuindo para isso, formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, melhorando a densificação da mistura. A composição na qual a CBC foi adicionada conjuntamente com o RC (S12C2RC2CBC), apresentou um valor próximo ao verificado quando foi adicionado somente o RC à mistura, mostrando que a incorporação dos dois resíduos proporcionou uma boa coesão à mistura.

Figura 28: Absorção de água dos tijolos moldados com cimento, CBC e RC



Fonte: Autor.

Os dados obtidos comprovaram a relação existente entre as propriedades físicas (resistência à compressão simples e absorção de água) com a densificação e a porosidade das composições, visto que as composições dos tijolos maciços das misturas, de solo-aglomerante(s) e solo-aglomerante(s) e RC e/ou CBC, que atingiram os maiores valores de resistência mecânica apresentaram os menores índices nos ensaios de absorção de água.

### 5.7.3 Durabilidade modificada dos tijolos maciços

O ensaio foi realizado adaptando-se aos preceitos previstos no método de ensaio DNER-ME 203/94 e aos limites estipulados pela NBR 13553/2012. SILVA (2013) realizou a durabilidade em tijolos e também em corpos de prova cilíndricos, pelo mesmo método do DNER citado anteriormente, e através dos resultados verificados para os tijolos, concluiu que os tijolos das composições moldadas com solo-cimento apresentaram uma menor perda de massa comparada com as composições moldadas com solo-cal.

De um modo geral, conforme apresenta a Tabela 13 e a Figura 29 a seguir, as composições dos tijolos moldados, na pesquisa, com solo-cimento também apresentaram uma menor perda de massa comparada com as composições de solo-cal.

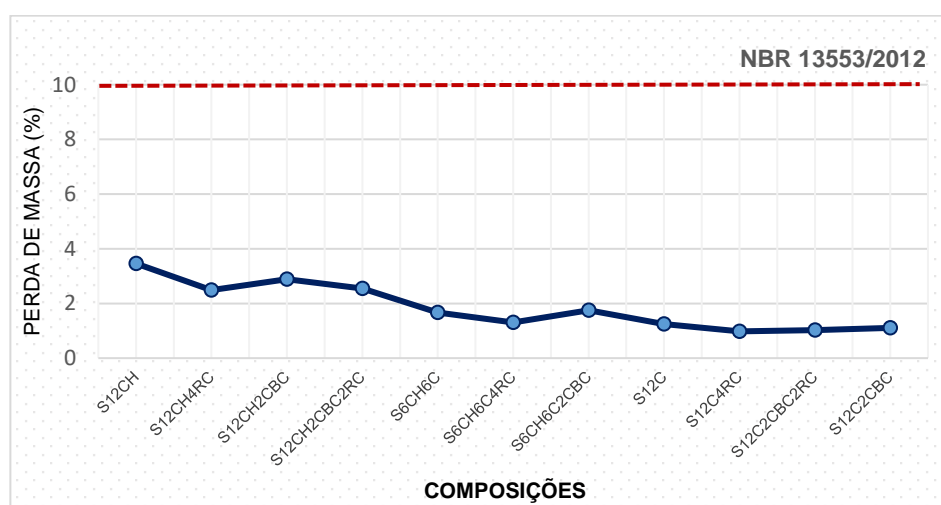
Tabela 13 - Perda de massa das composições dos tijolos

COMPOSIÇÕES	PERDA DE MASSA (%)
S12CH	3,46 ± 0,12
S12CH4RC	2,49 ± 0,26
S12CH2CBC	2,89 ± 0,36
S12CH2CBC2RC	2,55 ± 0,12
S6CH6C	1,67 ± 0,42
S6CH6C4RC	1,31 ± 0,05
S6CH6C2CBC	1,75 ± 0,51
S12C	1,25 ± 0,05
S12C4RC	0,98 ± 0,03
S12C2CBC2RC	1,02 ± 0,04
S12C2CBC	1,11 ± 0,02

Fonte: Autor

Essa redução nos valores das perdas de massas verificadas, possivelmente podem ser explicados pela solubilidade do hidróxido de cálcio, que à curto prazo provoca a floculação das partículas do solo e a formação de compostos cimentícios fracos (carbonatação), formando um composto menos resistente que os silicatos e aluminatos oriundos das reações pozolânicas e contribuindo para o elevado percentual de perda de massa da formulação solo-cimento em relação as misturas de solo-cimento (SILVA, 2013). Todas as composições atenderam à exigência da NBR 13553/2012 quanto à perda de massa, não ultrapassando 10% para os solos do tipo A-4.

Figura 29: Perda de massa das composições dos tijolos

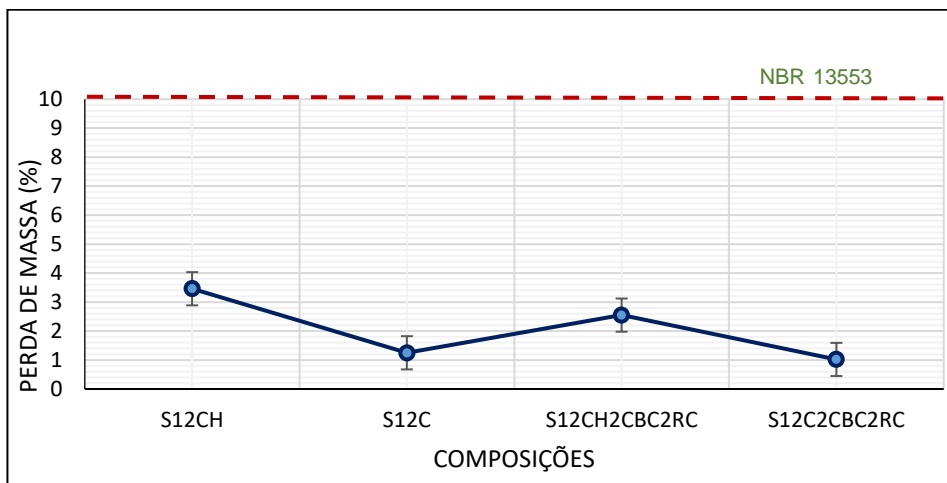


Fonte: Autor

A Figura 30 a seguir, mostra a perda de massa das composições dos tijolos prensados com solo-aglomerante(s) incorporando aos mesmos o RC e a CBC. Percebe-se, que as duas composições nas quais foram adicionados o RC e a CBC tiveram o valor da perda de massa reduzido, fato esse que pode ser explicado pela ocorrência da diminuição dos poros nos tijolos, consequência da incorporação dos resíduos na mistura. Com a adição dos resíduos a mistura, reações pozolânicas puderam ocorrer, tendo possivelmente contribuído para a formação de um composto mais resistente, reduzindo o percentual da perda de massa.



Figura 30: Perda de massa das composições com cal, cimento, RC e CBC.



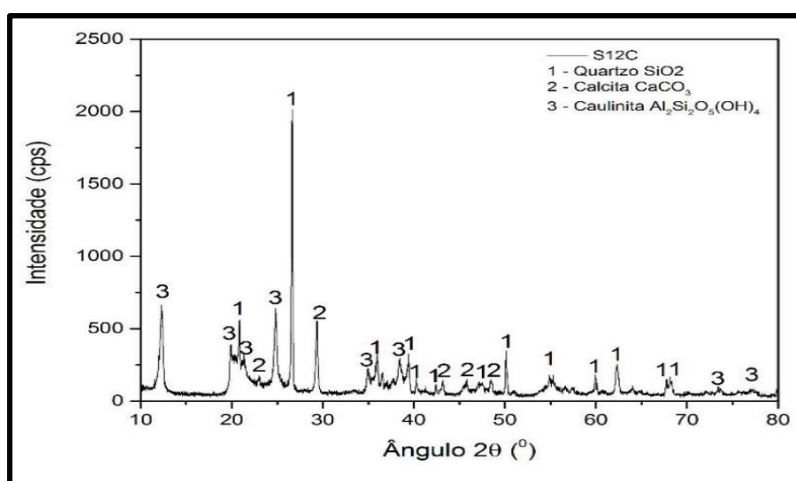
Fonte: Autor

## 5.8 ANÁLISE MINERALÓGICA DOS TIJOLOS

Algumas composições aplicadas na pesquisa, que apresentaram melhores resultados nos ensaios realizados (rompidas aos 56 dias), foram submetidas a ensaio de difração de raios X. As Figuras 31 e 32 apresentam a análise das composições realizadas.

A Figura 31 a seguir, mostra o DRX da composição S12C. Percebe-se a presença das fases mineralógicas quartzo, calcita e caulinita. A fração fina do solo mostra a predominância do quartzo e do argilomineral caulinita na composição. A fase calcita pode ser justificada pela presença do cimento como componente da composição, o que já era esperado devido ao alto teor de óxido de cálcio comprovado no FRX.

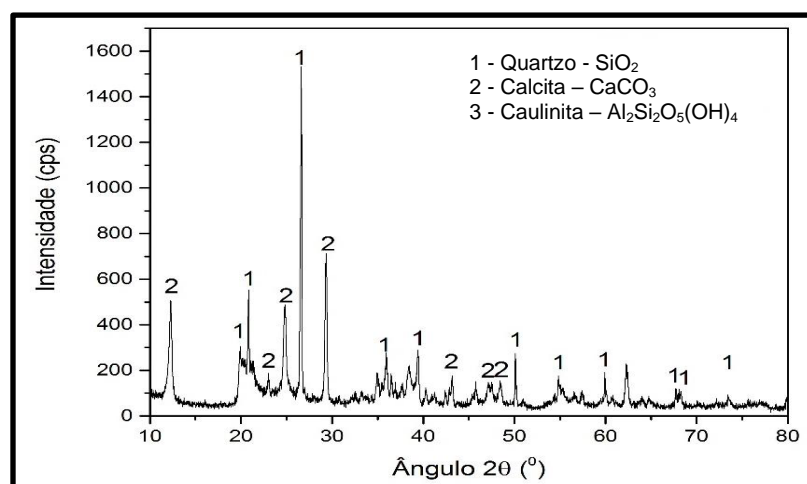
Figura 31: DRX da composição S12C



Fonte: Autor.

A Figura 32 apresenta o DRX da composição S12C4RC, na qual se observam, basicamente, picos de quartzo, comprovando os altos teores de sílica na composição do solo e do RC empregados na formulação, e picos de calcita que eram esperados devido à utilização de um cimento com adição de fíler calcário.

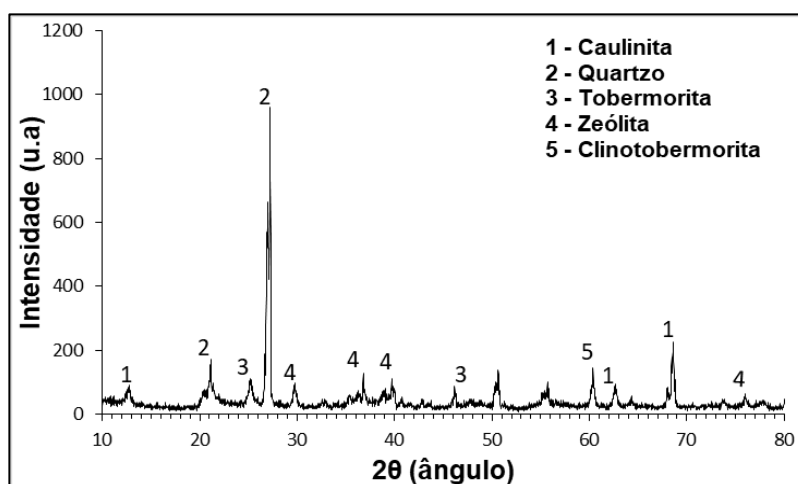
Figura 32: DRX da composição S12C4RC



Fonte: Autor

A Figura 33 a seguir, apresenta o DRX da superfície de fratura da composição S12C2CBC. Observam-se picos de caulinita, dióxido de silício em forma de quartzo, zeólita e dióxido de silício em maiores quantidades, corroborando com os resultados da análise do FRX realizado. No pico característico de maior intensidade de quartzo aparece outro pico próximo, indicando provavelmente alguma interferência com outra fase. Vários silicatos de

Figura 33: DRX da composição S12C2CBC



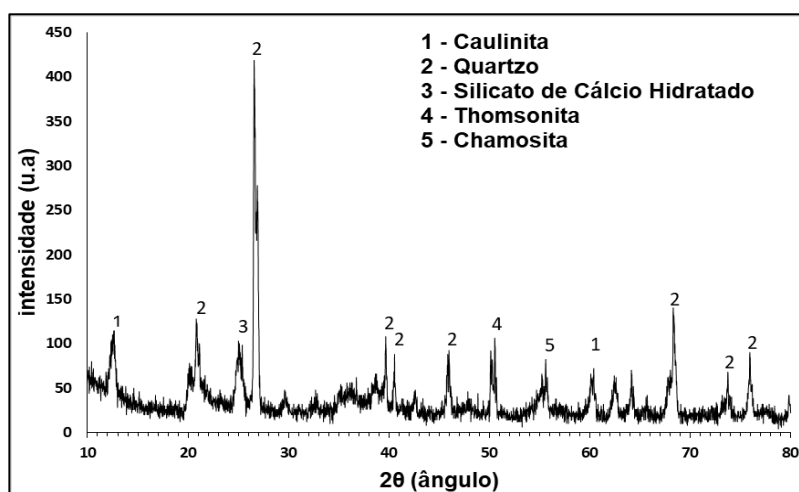
Fonte: Autor

cálcio hidratados foram observados nas fases de tobermorita e clinotobermorita, constatando as reações cimentícias provenientes da hidratação do cimento e de reações químicas com o solo e com a CBC.

O DRX da composição S12C2CBC2RC é apresentado na Figura 34 a seguir. Comparando com a Figura 33, nota-se uma maior quantidade de fases de silicatos e aluminatos presentes. Como o RC é rico em alumina e também é sinterizado, ocorre formação de aluminosilicatos hidratados. Também aparecem silicatos de cálcio hidratados formados pelo RC e CBC.

A fase chamosita, encontrada em  $55,5^\circ$  é um exemplo de aluminosilicato contendo ferro e magnésio –  $(Mg_{1.5}Fe_{7.9}Al_{2.6})(Si_{6.2}Al_{1.8}O_{20})(OH)_{16}$ . Destaca-se também a presença do silicato de cálcio hidratado (C<sub>2</sub>S) encontrado na fase  $Ca_2(SiO_4)(H_2O)$  e  $Ca_2(SiO_3OH)(OH)$ .

Figura 34: DRX da composição S12C2CBC2RC

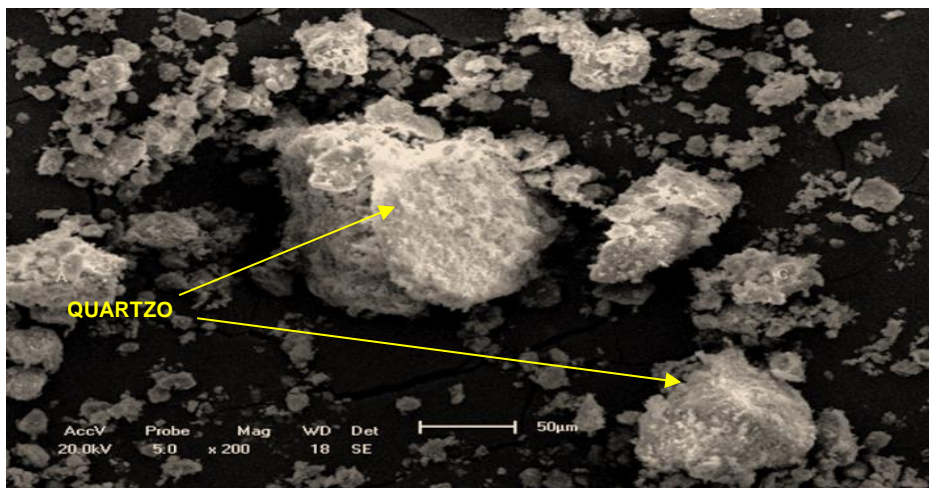


Fonte: Autor

## 5.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 35 a seguir apresenta a imagem do solo utilizado na pesquisa com um aumento de 200X. A micrografia do solo, com um aumento de 200 vezes, mostra a presença do mineral quartzo. Tal fato confirma os resultados obtidos nos ensaios de fluorescência de raio X (Tabela 3) e difração de raio X (Figura 14) onde foram constatadas as presenças dos elementos químicos Si, Al, O e Fe.

Figura 35: Micrografia do solo obtida por MEV. Ampliação 200X.

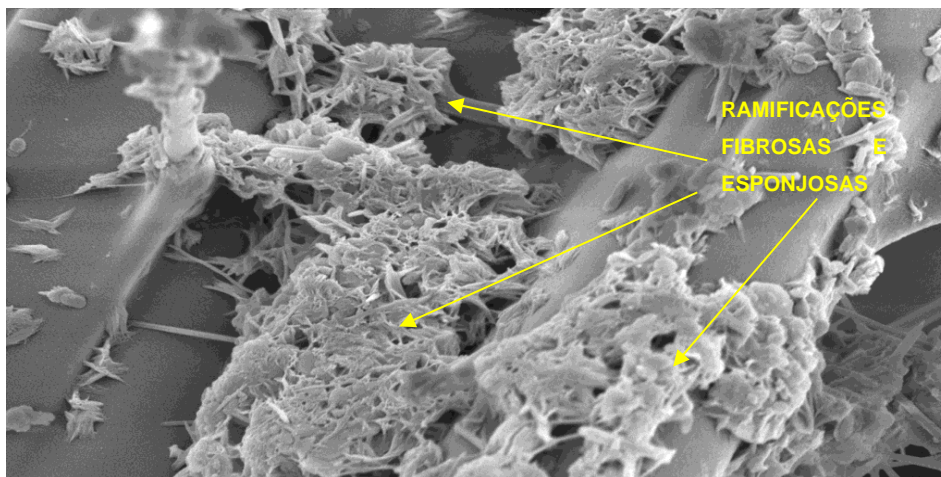


Fonte: Autor.

### 5.9.1 Análise da superfície de fratura das composições

Com as composições dos tijolos, que apresentaram melhores resultados nos ensaios físicos e mecânicos, anteriormente citados, rompidos aos 56 dias, foi realizada a microscopia eletrônica de varredura para analisar a superfície de fratura. As Figuras 36 e 37 a seguir, apresentam micrografias da superfície de fratura da composição S12C2CBC.

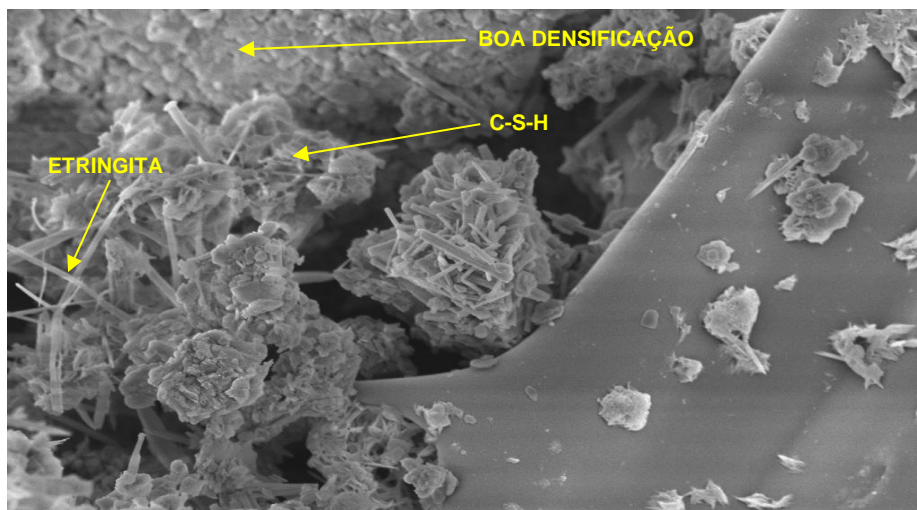
Figura 36: MEV da composição S12C2CBC. Ampliação 10KX



Fonte: Autor

Aparecem particulados heterogêneos, apresentando fibras com ramificações fibrosas e esponjosas semelhantes às apresentadas pelos silicatos de cálcio hidratados (CSH), as quais contribuem significativamente para preenchimento dos poros e a melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais de base cimentícia.

Figura 37: MEV da composição S12C2CBC. Ampliação 15KX

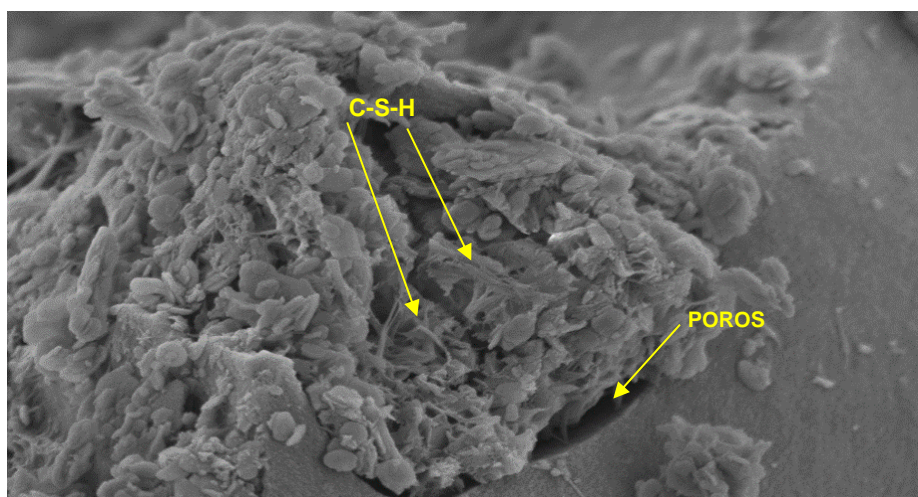


Fonte: Autor

Percebe-se uma microestrutura bem densificada com uma reduzida quantidade de poros, também se constata uma grande presença de partículas de quartzo, corroborando com o resultado do DRX do solo. São percebidos formação de pequenos feixes que podem ser etringita, imagens semelhantes às do livro de MEHTA e MONTEIRO.

As Figuras 38 e 39 a seguir, apresentam micrografias da superfície de fratura da composição S12C2CBC2RC. Observam-se poucos poros e uma microestrutura com boa densificação. O mineral quartzo está presente de maneira predominante, corroborando com o DRX do solo.

Figura 38: MEV da composição S12C2CBC2RC. Ampliação 20KX

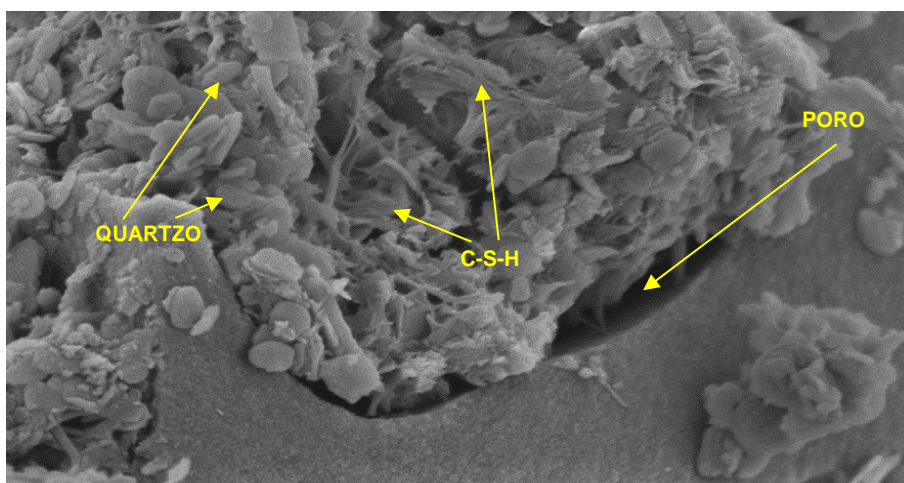


Fonte: Autor

Também são observadas ramificações fibrosas que se assemelham as apresentadas pelos silicatos de cálcio hidratados (CSH). Aglomerações

esponjosas também são percebidas. As estruturas de CSH foram possivelmente formadas através das reações cimentícias, ou ainda geradas pelo efeito pozolânico. A sílica desorganizada presente no solo, na CBC e no RC se recombina com a portlandita ( $\text{CaOH}_2$ ) que é outro composto resultante das reações cimentícias.

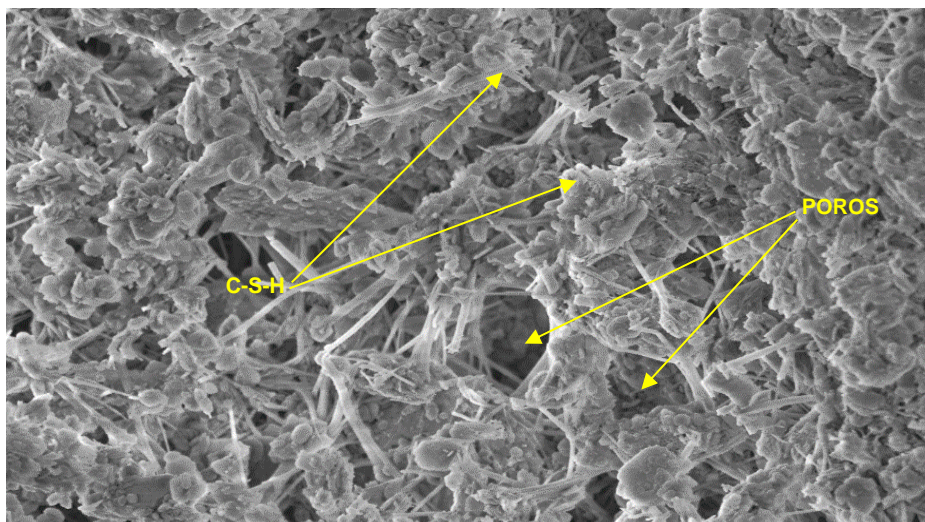
Figura 39: MEV da composição S12C2CBC2RC. Ampliação 30KX



Fonte: Autor

Micrografias da composição S6CH6C são apresentadas nas Figuras 40 e 41 a seguir. A Figura 40 (ampliação 10.000X) mostra uma microestrutura bem densificada com poucos poros. Percebe-se pequenas ramificações fibrosas e esponjosas semelhantes as apresentadas pelo C-S-H.

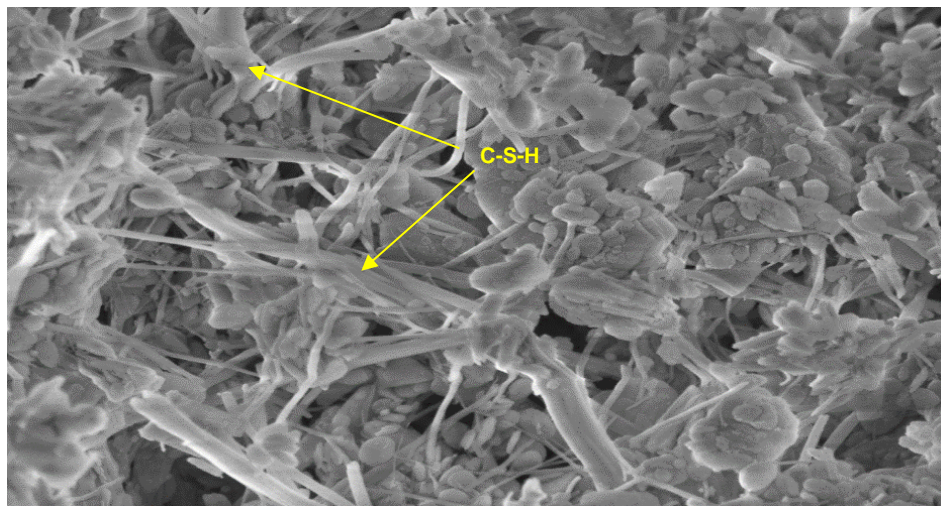
Figura 40: MEV da composição S6CH6C. Ampliação 10KX



Fonte: Autor

A Figura 41 (ampliação 20.000X) apresenta as ramificações fibrosas e esponjosas (C-S-H) mais bem formadas, apresentando também poucos poros boa densificação na microestrutura da composição.

Figura 41: MEV da composição S6CH6C. Ampliação 20KX



Fonte: Autor

## 5.10 ANÁLISE DA RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO REFERENTE À PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-AGLOMERANTE(S) COM RC E/OU CBC, COMPARANDO AO TIJOLO CERÂMICO CONVENCIONAL EXISTENTE NO MERCADO LOCAL.

### 5.10.1 Quantitativos e encargos utilizados na análise:

- Cimento Portland (saco com 50 kg) = R\$ 20,00 (valor médio encontrado no comércio local);

- Cal (saco com 20 kg) = R\$ 10,00 (valor médio encontrado);

- Os encargos sociais, bem como o custo de mão-de-obra, foram considerados com base na tabela de encargos do SINDUSCON/RN (2019-2020):

Mão de obra (profissão pedreiro): R\$ 6,33/hora;

Total dos encargos sociais: 142,7% (encargos sociais básicos, 16,8% + encargos sociais trabalhistas, 51,24% + encargos sociais indenizatórios, 18,3% + incidências cumulativas, 12,77% + encargos intersindicais, 43,6%)

IPI: 5% do custo unitário

**5.10.2 Produção de 20 tijolos (dimensões 5,0 X 10,0 X 21,0 cm) da composição S12C4RC. Cálculo do custo unitário do tijolo.**

Materiais e insumos utilizados:

Solo – 32 kg;

Cimento – 3,84 kg (12% em relação à massa do solo);

Resíduo cerâmico – 1,28 kg (4% em relação à massa do solo);

Mão de obra – R\$ 6,33/hora;

Estimativa de produção da prensa manual utilizada (Sahara Hobby) – 100 unidades/hora;

Encargos sociais – 142,7%;

IPI – 5% do custo unitário.

Kg do Cimento = R\$ 0,40

Valor total do cimento para 01 tijolo =  $(3,84 \times 0,40) / 20 = \text{R\$ } 0,0768$ .

Custo unitário dos materiais = R\$ 0,0768

Mão de obra =  $(6,33/h) / 100 \text{ unidades/hora} = \text{R\$ } 0,0633$

Custo unitário da mão de obra + encargos sociais =  $0,0633 \times 2,427 = \text{R\$ } 0,1536$

Custo unitário dos materiais + mão de obra = R\$ 0,2304

Custo unitário do tijolo + IPI =  $0,2304 \times 1,05 = \text{R\$ } 0,2419$  (valor aproximado de R\$ 0,24).

**5.10.3 Produção de 20 tijolos (dimensões 5,0 X 10,0 X 21,0 cm) da composição S12C2CBC2RC. Cálculo do custo unitário do tijolo.**

De maneira análoga à análise feita para a composição anterior, temos:

Valor total do cimento para 01 tijolo =  $(3,84 \times 0,40) / 20 = \text{R\$ } 0,0768$ .

Custo unitário dos materiais = R\$ 0,0768

Mão de obra =  $(6,33/h) / 100 \text{ unidades/hora} = \text{R\$ } 0,0633$

custo unitário da mão de obra + encargos sociais =  $0,0633 \times 2,427 = \text{R\$ } 0,1536$

custo unitário dos materiais + mão de obra = R\$ 0,2304

custo unitário do tijolo + IPI =  $0,2304 \times 1,05 = \text{R\$ } 0,2419$  (valor aproximado de R\$ 0,24).



#### 5.10.4 Comparação dos valores encontrados para os tijolos

O valor unitário do tijolo para as duas composições foi o mesmo, pois o percentual de cimento utilizado nessas composições foi igual. Todas as composições moldadas utilizando somente o cimento como aglomerante no percentual de 12%, também apresentam esse mesmo valor, ou seja, R\$ 0,24, como custo unitário do tijolo. Todas as composições dos tijolos moldadas com cal ou com cal + cimento (reduzindo dessa maneira o percentual de cimento utilizado) apresentam valor unitário do tijolo inferior a R\$ 0,24, devido ao preço da cal ser inferior ao do cimento. Os resíduos foram obtidos a custo zero, e não foram considerados nenhum custo de transportes.

O preço unitário médio do tijolo cerâmico maciço convencional encontrado no comércio local foi R\$ 0,26 e o preço unitário médio do tijolo de oito furos foi R\$ 0,45. O valor encontrado no comércio para o tijolo maciço convencional foi maior que o valor do tijolo produzido na pesquisa. Para o tijolo de oito furos (bloco cerâmico vazado para alvenarias de vedação), o valor médio encontrado no comércio local foi consideravelmente maior quando comparado ao valor do tijolo produzido na pesquisa.

Analisando o tijolo cerâmico convencional e o tijolo produzido na pesquisa, em termos de custo unitário houve diferença entre eles, o da pesquisa teve um valor menor. Além de ter apresentado um custo menor, o tijolo ecológico produzido na pesquisa, proporciona benefícios quando da sua utilização do ponto de vista ambiental, pelo fato de não precisar ser sinterizado, evitando danos a flora e também promovendo a destinação correta de resíduos que seriam descartados no meio ambiente ocasionando com isso sérias consequências ao mesmo. A Figura 42 mostra tijolos produzidos na pesquisa.

Figura 42: Tijolos produzidos na pesquisa



Fonte: Autor

## **CAPÍTULO 6**

## **CONCLUSÕES**

## 6 CONCLUSÕES

- Os resultados das análises granulométricas, tanto do RC como da CBC, mostraram elevado percentual de finos em ambos os resíduos, colaborando para um bom empacotamento das partículas ocorrido durante a prensagem das composições dos tijolos;

- A adição do RC e da CBC, aos aglomerantes das composições formuladas, resultou melhoria em todas as composições dos tijolos produzidos. Isso foi constatado, tanto nos ensaios físicos e mecânicos, como nos de DRX e MEV;

- A composição quaternária S12C2CBC2RC e a ternária S12C4RC moldadas em tijolos maciços, apresentaram uma microestrutura mais homogênea e melhor densificada;

- As composições S12C2CBC2RC e S12C4RC obtiveram os melhores resultados nos experimentos realizados para mensurar a resistência mecânica, a absorção de água e a perda de massa (durabilidade modificada), quando comparadas as outras composições quaternária e ternária respectivamente;

- A partir da análise dos dados obtidos, nos ensaios físicos, químicos, mecânicos, mineralógicos e da microestrutura da superfície de fratura das composições, descritos na metodologia aplicada na pesquisa, concluiu-se que a adição do RC nos teores de 2% e 4% e da CBC no teor de 2%, nas composições de solo-aglomerante(s) com percentuais de 6% e 12%, confirmou a viabilidade técnica do RC e da CBC no processo de melhoria das propriedades físicas e mecânicas das composições formuladas para a produção dos tijolos maciços, atendendo as disposições das normas técnicas Brasileiras vigentes para uso em alvenarias sem fins estruturais;

- A adição do RC e da CBC na fabricação de tijolos de solo aglomerante(s) mostrou-se viável tecnicamente e economicamente, sendo, portanto, uma alternativa para o aproveitamento desses resíduos, diminuindo conseqüentemente a quantidade dos mesmos na natureza, contribuindo dessa maneira para a obtenção de um ambiente menos poluído.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Aplicar a mesma metodologia adotada nessa pesquisa para novas formulações de solo-aglomerante(s) com adições de outros resíduos que apresentem índice de pozolanicidade compatíveis com as exigências da NBR 12653/2014;

- Estudar a incorporação de teores de RC e/ou CBC nas formulações de solo-aglomerante(s) para produção de blocos a serem utilizados na execução de alvenarias estruturais;

- Estudar a possibilidade da incorporação de teores de RC e/ou CBC nas formulações de solo-aglomerante(s) para produção de tijolos maciços a serem utilizados na execução de alvenarias estruturais de acordo com as exigências da NBR 8491/2012;

- Investigar e analisar a possibilidade da substituição parcial do cimento e/ou cal pelo RC e/ou CBC para produção de blocos e tijolos maciços destinados à construção de alvenarias sem fins estruturais.

-

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos.** Rio de Janeiro, RJ, 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Versão corrigida 2. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, RJ, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491: Tijolos de solo-cimento – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492: Tijolo de solo cimento – Análise dimensional, Determinação da resistência à compressão e da Absorção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento.** Rio de Janeiro, RJ, 2012.

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 12653: Materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro, RJ, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13553:**

**Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, 2018.

**ABCP** - Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, SP, 2002.

**ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com utilização de prensas manuais.** São Paulo: ABCP, 2012.

ABIKO, A.K. **Introdução à gestão habitacional.** São Paulo, EPUSP, 1995. (texto técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Tt/ Pcc/ 12).

**ABPC** - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. São Paulo, SP, 1990.

**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.

ABRECON – **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**, 2016. <https://abrecon.org.br/>, acesso nov/2018.  
ACCHAR, W. **Materiais cerâmicos: caracterização e aplicações.** Editora da UFRN-EDUFRN. Natal, RN, 2006.

ACCHAR, W.; PARANHOS, R. J. S. **Using sugar cane bagasse ash into clay products.** *J. Solid waste technology and management*. V. 38, N. 1, P. 5-9, Feb., 2012.

ALMEIDA, F. do C. R. **Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concretos com substituição parcial do agregado miúdo pela areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar** - ACBC. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2013.

ANDRADE FILHO, J. **Reforço de solos com a utilização de tubulões em solo-cimento.** São Carlos, SP: USP, 1989. 190 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1989.

ANICER, **ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA.** Relatório Anual 2016.

**ANUÁRIO ESTATÍSTICO:** setor transformação não metálicos/ Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral. 2006 – Brasília: SGM, 2018.  
AOKI et al. **Cimento e concreto: aspectos práticos para a construção civil.** Material técnico Cia. de cimento Itambé. 1996.

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

BAHURUDEEN, A. et al. **Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete**. Cement and concrete composites, V. 59, P. 77–88, 2015.

BARBA, A., FELIU, C, et. al. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerâmicas**. 1ed. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1997, 290p.

BARBOSA, M.P. e PRABHU, A.S, 2002, **Aplicação do silicato de cálcio na cultura do arroz**. Embrapa: Santo Antônio de Goiás.

BARÔNIO, G. E. et al. **Study of the pozzolanicity of some bricks and clays construction and building materials**. Vol.11, Nº 1, 1997.

BARROSO, T. R., **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físicas e químicas**. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2011.

BAUR, L. et al. **Dissolution-precipitation behavior of ettringite, monosulfate, and calcium silicate hydrate**. Cement and concrete research, V.34, Nº 2, 2004.

BERNUCCI, L.B. et al. **O método das pastilhas na compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos solos: Um Recurso Didático**. Anais Do XVI ANDET, Natal, RN, 2002.

BESSA, SOFIA ARAÚJO LIMA. **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. Tese (Doutorado)São Carlos: UFSCar, 2011.

BEZERRA, U.T. **Compósitos Portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo. Tese (Doutorado)** – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Natal-RN, 2006. 287p.

BLACK, L., et al. **Characterisation of crystalline c-s-h phases by x-ray photoelectron spectroscopy**. Cement and Concrete Research. V.33, Nº 11. 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanco nacional da cana-de-açúcar e Agroenergia**. Brasília: Mapa/Spae, 2007a.

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, RN, 2007.

CÂMARA, EVERLEI. **Efeitos da substituição parcial de agregados miúdos por cinzas residuais do bagaço da cana-de-açúcar no processo de hidratação do cimento.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2015.

CAPELLO, GIULIANA. **Cimento Ecológico: produto tem nível de CO<sub>2</sub> reduzido em sua fórmula, causando menos impactos no meio ambiente.** Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.uol.com.br/inc/pop/print.html>>. acesso em: 13 mar. 2012.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**, volume1. editora Ltc. 6ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

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

CASTALDELLI, V. N., AKASAKI, J. L., MELGES, J. L.P., et al., “**Use of slag/sugar cane bagasse ash (scba) blends in the production of alkali-activated materials**”, *Materials*, V. 6, Pp. 3108-3127, 2013.

CBCS, **Conselho Brasileiro De Construção Sustentável.** 2017. [www.cbcs.org.br](http://www.cbcs.org.br). Acesso em abril de 2018.

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

CHEN, C.; SUN, C.; GAU, S.; WU, C.; CHEN, Y. **The effects of the mechanical-chemical stabilization process for municipal solid waste incinerator fly ash on the chemical reactions in cement paste.** *Waste Management*, V.33, P.858–865, 2013.

CHEN, J.C.P., CHOU, C. **Cane sugar handbook.** A manual for cane sugar manufacturers and their chemists. 12nd.ed. New York John Wiley & Sons, 1993.

CHEN, M.C. and DETRICH, H.W. III (1999) **Kinesin-like microtubule motors in early development.** In the zebrafish: biology. h.w. detrich, l.i. zon, and m. westerfield, eds. *methods cell biol.*. 59:227-250.

CIMENTO.ORG. **O Mundo Do Cimento.** Disponível: [www.cimento.org](http://www.cimento.org). Acesso Em Out 2014.

COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa:** Um modelo para o estado de SP. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 1999.



COLLEPARDI, M. A. **State-of-art review on delayed ettringite attack on concrete.** Cement and concrete research, V.25, Nº 3-4.2003.

**CONAB**, Safra Bras. Cana-De-Açúcar, V. 1 – Safra 2016/17, N.2 - Segundo Levantamento, Brasília, , Ago. 2017.

CORDEIRO, A. C. et al. **Aplicação de resíduo cerâmico como adição mineral na produção de argamassas e concreto.** Revista Brasileira de ciências ambientais, nº 3. 2006.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., FAIRBAIRN, E. M. R., **“Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in portland cement and lime mortars”**, Cement & Concrete Composites, v. 30, pp. 410–418, 2008.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN E. M. R., **“Characterization of sugar cane bagasse ash for use as pozzolan in cementitious materials”**, Química nova, V. 32, N.1, Pp. 82–86, 2009.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., **“Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash”**, Construction and building materials, v. 23, n. 10, pp. 3301-3303, 2009a.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., FAIRBAIRN, E. M. R., **“Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete”**, Cement and concrete research, v. 39, n. 2, pp. 110-115, 2009b.

CORDEIRO, G. C. et al. **Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes.** Construction and building materials, v. 29, P. 641–646, Abr. 2012.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPP, J. **Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização.** Revista brasileira de energia, Campinas, v. 2, n. 2, p. 111- 146,1992.

DE PAULA, M. O. et al. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 031, p. 353–357, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER ME 203 – 94. Solo-cimento – determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem.**

DMC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - **UFRGS**, 2000.

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.

EL-ATTAR, MOHAMED M.; SADEK, DINA M.; SALAH, AMIR M. **Recycling of high volumes of cement kiln dust in bricks industry**. Journal of cleaner production, v. 143, p. 506-515, 2017.

FACHINI, D. **Aglomerante alternativo para construção civil**, Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica e de materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FARIA, K. C. P; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. **Characterization of sugarcane bagasse ash for use in ceramic bodies**. Article, oct 2010, Materials Science Forum.

FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas produzidas de resíduo de construção e granito**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, PB, 2007.

FERNANDES, G. **Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associado à geossintética**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Brasília- UNB. Brasília, DF, 2005.

FONSÊCA, NAYARA JHÉSSICA MARQUES da. **Potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico**. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

FREITAS, E. S. **Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos de Goytacazes para uso na construção civil**, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos Dos Goytacazes, RJ, 97 p, 2005.

GANESAN, K., RAJAGOPAL, K, THANGAVEL, K., “**Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material**”, cement and concrete composites, v. 29, n. 6, pp. 515-524, 2007.

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

GÓIS, LUCIANO COSTA de. **Estudo Da Incorporação Da Cal Em Composições Binárias De Solo-Cimento Para Produção De Tijolos Maciços**. 2012. 118 F. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

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.

HEISE, ANDRÉ FALLEIRO. **Desenho do processo e qualidade na construção do painel monolítico de solo-cimento em taipa de pilão**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, SP. 2004.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção. seminário – reciclagem de resíduos sólidos domiciliares**. Secretaria de estado do Meio Ambiente. Governo do estado de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

JORDAN, R.A., COSTA, M.V. DA, MARTINS, E.A.S., ROSA, M.A., PETRAUSKI, A., 2019. **Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane bagasse ash**. Eng. Agrícola 39, 26–31.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n1p26-31/2019>

KAZMI, S.M.S., ABBAS, S., SALEEM, M.A., MUNIR, M.J., KHITAB, A., 2016. **Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes**. Constr. Build. Mater. 120, 29–41.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084>

LAWRENCE, P. et al. **Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials On Short-Term Hydration**. Cement and Concrete Research, V.33, Nº 12. 2003.

LIMA, D.C. et al. **Estabilização dos Solos**. Imprensa Universitária. Viçosa, MG, 1993.

LIMA, S. A., ROSSIGNOLO, J. A. **Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios**. Acta scientiarum. Technology Maringá, V. 32, N. 4, P. 383-389, 2010.

LIMA, S. A., HUMBERTO, V., SALES, A., NETO, V.F. 2012. **Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash**. Construction & Building Materials, V. 35, P. 829-837.

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. Rio de Janeiro, 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.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K., 1996, **Pozzolanic and cementitious materials**, 1 ed. Amsterdam: Gordon and breach publishers, 191 p.

MARAGON, M. **Proposições de estruturas típicas de pavimentos para região de Minas Gerais utilizando solos lateríticos locais a partir da pedologia, classificação MCT e resiliência**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

MARQUES, S.K.J. **Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2015. 132 f. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande Do Norte, Natal, 2015.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDEENDORF, B., GEHRKE, M., BULDELMANN, H. **“Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction”**, Cement and concrete research, v. 28, n. 11, pp. 1525-1536, 1998.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F., BETANCOURT RODRÍGUEZ S., MIDDEENDORF, B., et al., **“Pozzolanic properties of residues of sugar industries (first part)”**, Journal: Materiales de Construcción, V. 50, N. 260, Pp. 71-78, 2000.

**Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais** ed. G. C. Isaia - São Paulo: **IBRACON**, 2007. 2 volumes.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ .Rio de Janeiro,RJ,1997.

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, 1 ed., São Paulo, Pini, 1994.

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

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

MORAES, J.C.B., AKASAKI, J.L., MELGES, J.L.P., et al., **“Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars”**, Construction and Building Materials, v. 94, pp. 670–677, 2015.

MORALES, E. V., COCIÑA, E. V., FRÍAS, M., et al., **“Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (scwa): influence in the pozzolanic activation”**, Cement & Concrete Composites, V. 31, Pp. 22–28, 2009.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; DAMATTY, A. El. **Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete**.

Department of civil and environmental engineering, University of Western Ontario, 1151 Richmond Street, London, on, Canada n6a 5b9, 2003.

NEVES, JÚLIO CÉSAR LIMA. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. Universidade Estadual do Norte Fluminense; dezembro de 2000.

NEVILLE, A. **Propriedades Do Concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2º ed. Pini.São Paulo,SP,1997.

NOBREGA, M.T. **As reações dos argilominerais com a cal**. Associação Brasileira de produtores de cal, boletim 14, São Paulo, SP, 1985.

NOGAMI, J.S. **Aspectos gerais de solos tropicais e suas aplicações em estradas de rodagem**. In **colóquio de solos tropicais e suas aplicações em Engenharia Civil** . 1985. Porto Alegre. p.1-15.

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

NOGAMI, J.S. et al. **Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas**. São Paulo, SP, 2000.

NUNES, I.H.S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. PEU/Universidade Estadual de Maringá, 2009.

OLIVEIRA, D. F. et al. **Durabilidade de compósitos de concreto Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 1, 2. 2006. Disponível em: [www.dema.ufcg.edu.br/revista](http://www.dema.ufcg.edu.br/revista).

OLIVEIRA, S. M. et al. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira De Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo- FAPESP. São Paulo, SP, 1998.

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

PARANHOS, R. J. S. **Uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como matéria-prima na substituição dos fundentes para aplicações em porcelanato**. 2015. 130 f. Tese (Doutorado) – Ciência e engenharia de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

PASTORE, E. L. et al. **Caracterização e classificação de solos**. in: Geologia de engenharia. Editores: Antonio dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves de Brito. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, SP,1998.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** (Dissertação De Mestrado). Universidade Federal De Viçosa (Ufv) 2006.

PAYÁ, J., MONZO, J., BORRACHERO, M. V., et al., “**Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production**”, Journal of chemical technology & biotechnology, v. 77, n. 3, pp. 321-325, 2002.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de centrais cogedoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo: exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética.** Dissertação M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 178 P, 2002.

PEREIRA, E. A. **Diagnóstico dos problemas de gestão de obras habitacionais de interesse social em empresas privadas.** Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG. Belo Horizonte, MG, 2008.

PINHEIRO, SAMANTHA COELHO. **Influência de sílica gel e de partículas micro e submicrométricas produzidas a partir da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na hidratação e estrutura de poros de pastas de cimento.** Samantha Coelho Pinheiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/Coppe, 2015.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos** – Editora oficina de textos. 3ª edição. São Paulo, SP, 2006.

RESENDE, M. **500 Anos De uso do solo no Brasil.** In: ARAUJO, Q. R. de.(Org.) 500 Anos de uso do solo no Brasil. Editus. Ilhéus, BA, 2002.

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR NÚCLEO DO CONHECIMENTO. **Edição 06. Ano 02, vol. 01.** pp 425-438, Setembro de 2017.

REZENDE, MARIANA FELICETTI. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo.** 118f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 2016.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias.** Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2012.

ROJAS, J. W. J. et al. **Durabilidad de um suelo contaminado y tratado com cemento Portland.** In: Ingenieria de Construcción. Vol. 23, N° 3. 2008. Disponível em [www.scielo.cl/pdf/ric/v23n3/art04.pdf](http://www.scielo.cl/pdf/ric/v23n3/art04.pdf).

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. **Utilization of bagasse ash in high-strength concrete.** Materials & Design, v. 34, p. 45–50, fev. 2012.

SALES, A., LIMA, S. A., 2010. **Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement,** waste management, v.30 pp. 1114–1122.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2<sup>o</sup> ed. São Paulo. Edgard Blucher Ltda. v.1. São Paulo, SP, 1989.

SCHETTINO, M. A. S. **Desenvolvimento de grês porcelanato incorporado com resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar: processamento, propriedades e microestrutura**. 2013. 125 F. Tese (Doutorado em engenharia e ciência dos materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, 2013.

SEBRAE - **Serviço Brasileiro de Apoio as Micro e Pequenas Empresas** –, Unidade de Capacitação Empresarial - Brasília/DF, 2011.

SEGANTINI, ANTÔNIO ANDERSON DA SILVA; CARVALHO, DAVID DE. **Comportamento ao longo do tempo de estacas moldadas in loco com solo-cimento plástico**. Anais do 4<sup>o</sup> Seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia. São Paulo. 17-20 jul. 2000-a.

SEGANTINI, ANTÔNIO ANDERSON DA SILVA; CARVALHO, DAVID DE. **Aplicação de solo cimento em elementos de fundação**. Evolução da pesquisa em Ilha Solteira-SP. Anais do 4<sup>o</sup> Seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia. São Paulo. 17-20 jul 2000-b. p. 339-348.

SHERWOOD, P. T. **Soil stabilization with cement and lime: State of the art review**. Hmsco, London, 1993.

SILVA, EMERSON JOSE DA. **UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA ANÁLISE DA POZOLANICIDADE DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. 17/02/2016 82 f. Mestrado em ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL Instituição de Ensino: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Caruaru Biblioteca Depositária: UFPE (CAA 2016-033).

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

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

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

SINGH, N. B., SINGH, V. D., RAI, S., **“Hydration of bagasse ash-blended portland cement”**, Cement and concrete research, V. 30, Pp. 1485-1488, 2000.

SNIC – Resultados Preliminares 2015. **Sindicato nacional da indústria do cimento**: Rio de Janeiro, 2016.

<http://www.snic.org.br/pdfresultado/resultados%20preliminares%20dezembro%202015.pdf>.

SNIC – Notícias. **Sindicato nacional da indústria do cimento**: Rio de Janeiro, 2019.

SNIC – Resultados Preliminares 2019. **Sindicato nacional da indústria do cimento**: Rio de Janeiro, 2020.

STEPKOWSKA E. T, J. L. PEREZ-RODRIGUEZ, M. A. AVILES, M. J. JIMENEZ DE HARO AND M. J. SAYAGUES, **Journal of thermal analysis and calorimetry**, July 2002, volume 69, pp 187–204.

TOMMASELLI, M. A. G. ; LIMA, A. V.; TSUJI, E. R. ; CHUBA, C. A. M. ; ALVES, A. L. **Alternativa de utilização sustentável do resíduo cinza, oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar, incorporando-a ao concreto como agregado**. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2011, Belo Horizonte. Anais... XXXI Encontro nacional de engenharia de produção (ENEGEP), 2011. P. 1-8.

UNICA. **União da indústria de cana-de-açúcar**. Agroindústria Balanço de Atividades de 2010. São Paulo: Unica, 2010.

UNICA. **União da indústria de cana-de-açúcar**. Agroindústria Balanço de Atividades de 2016. São Paulo: Unica, 2016.

UNICA - **União da agroindústria canavieira do estado de São Paulo (2016 - 2017)** disponível na internet:<<http://www.unica.com.br>>. acesso em novembro 2017.

UNICA. **União da Indústria de cana-de-açúcar**. Agroindústria Balanço de Atividades de 2018. São Paulo: Unica, 2018.

US.GEOLOGICAL SURVEY/MINERAL COMMODITY SUMMARIES – **USGS**, 2016.

US.GEOLOGICAL SURVEY/MINERAL COMMODITY SUMMARIES – **USGS**, 2017.

VARGAS, MILTON. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: Mcgraw-Hill, 1977.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Macgraw-Hill. São Paulo, SP. 1978.



VASCONCELOS, M.C.A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba- UFPB. João Pessoa, PB, 2002.

VILLIBOR, DOUGLAS FADUL et al. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas.** 2. Ed. São Paulo: Arte e Ciência, 2009. 193 p.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos.** São Paulo: Arte & ciência, 2009. 291p.

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

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E.M.; MARTELLO, L.S.; SAVASTANO JR., H. **Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como "filler" em compostos de fibrocimento.** In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável/X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. Anais. São Paulo: Entac, 2004.