

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZAS DE
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

MATEUS CARVALHO AMARAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO – 2014

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

MATEUS CARVALHO AMARAL

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como parte
das exigências para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia e Ciência dos
Materiais”.

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2014

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

MATEUS CARVALHO AMARAL

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”

Aprovado em 19 de Fevereiro de 2014.

Comissão Examinadora:

Prof.^a Ana Lúcia Diegues Skury (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) - UENF

Prof.^a Márcia Giardinieri de Azevedo (D.Sc, Engenharia e Ciência dos Materiais) - UENF

Prof. André Zotelle Destefani (D.Sc, Engenharia e Ciência dos Materiais) – IFF

José Nilson França de Holanda (DSc.Engenharia de Materiais) – UENF

Orientador

DEDICATÓRIA

À Deus pela proteção e guarda. Aos meus queridos pais Eduardo Amaral e Solange Amaral, pelo amor incondicional a mim dispensado. Aos meus irmãos pelo carinho e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo em minha vida, e ao Divino Espírito Santo por iluminar minha inteligência possibilitando assim a superação dos obstáculos desta jornada.

Aos meus pais, Eduardo e Solange, que estiveram presentes em todos os momentos da minha vida, me ensinando o verdadeiro sentido da palavra família.

Aos meus irmãos, Eduardo José e Priscila, que me acompanharam desde os primeiros passos na infância. E aos meus sobrinhos Júnior e Gabriel, por encherem nossa casa de alegria.

A todos os meus familiares que se alegram com essa vitória. E à Lucinéia, que quando deveria ter sido apenas uma babá, foi amiga, companheira, confidente, tornando-se assim uma segunda mãe.

A todos os formados da turma de 2006 do CENEC, por terem me ensinado o verdadeiro sentido de amizade, união e cumplicidade. E aos professores e funcionários do CENEC que contribuíram para que esta época da minha vida se tornasse inesquecível. E a todos os meus amigos de Miracema, principalmente os amigos Rodrigo, Meneguel, Charles, Mara, Felipe e Caré, por terem proporcionado grandes momentos de felicidade e compartilhado os de tristeza, sendo não só amigos, mas sim irmãos.

A todos os amigos que conquistei nesta universidade, por terem vivido comigo momentos de descontração e os de dificuldade. E a minha noiva Maria Clara, que foi fiel companheira sempre presente todos estes anos aqui em Campos, amenizando de alguma forma a saudade que sentia de casa.

Aos meus colegas do laboratório, André, Fabrício e Raphael, pela ajuda, que foi essencial para a realização deste trabalho. E as empresas, Cerâmica Sardinha e Usina Sapucaia, que forneceram as matérias-primas.

Aos professores do LAMAV pela minha formação e de maneira especial, ao meu orientador, professor José Nilson França de Holanda, pela atenção, paciência, ajuda e por todo o conhecimento adquirido na realização deste trabalho.

Ao PIBIC, FAPERJ e UENF, pelo apoio financeiro.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tabelas.....	XIII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Justificativas.....	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Tijolo solo-cimento.....	4
2.1.1. Aplicações.....	5
2.1.2. Vantagens.....	6
2.2. Processo de fabricação do tijolo solo-cimento.....	7
2.2.1. Matérias-primas utilizadas.....	9
2.2.1.1. Solo.....	10
2.2.1.2. Cimento.....	12
2.2.1.2.1. Processos químicos de hidratação do cimento..	16
2.2.1.3. Água.....	17
2.2.2. Propriedades tecnológicas.....	18
2.3. Resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC).....	18
2.3.1. Incorporação de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em tijolo solo-cimento.....	21
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1. Aquisição e beneficiamento das matérias-primas.....	29
3.1.1. Solo.....	30
3.1.2. Cimento.....	31
3.1.3. Água.....	31

3.1.4. Resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC).....	31
3.2. Caracterização das matérias-primas.....	32
3.2.1 Caracterização do solo.....	32
3.2.1.1. Caracterização química.....	32
3.2.1.2. Caracterização física.....	33
3.2.1.3. Caracterização mineralógica.....	34
3.2.2. Caracterização do cimento.....	34
3.2.2.1. Caracterização química.....	34
3.2.2.2. Caracterização física.....	34
3.2.2.3. Caracterização mineralógica.....	35
3.2.3. Caracterização do resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC).....	36
3.2.3.1. Caracterização química.....	36
3.2.3.2. Caracterização física.....	36
3.2.3.3. Caracterização mineralógica.....	36
3.2.3.4. Determinação da atividade pozolânica.....	37
3.3. Confecção dos corpos de prova incorporados com resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC).....	37
3.3.1. Traços estudados.....	37
3.3.1.1. Preparação da mistura.....	39
3.3.1.2. Prensagem.....	40
3.3.1.3. Cura.....	41
3.4. Análise das propriedades das misturas preparadas.....	42
3.4.1. Ensaio de resistência à compressão simples.....	42
3.4.2. Ensaio de Absorção de água.....	43
3.4.3. Massa específica aparente.....	43
3.4.4. Variação dimensional.....	44
3.5. Análise microestrutural e de fases das misturas.....	44
3.5.1. Análise microestrutural.....	44
3.5.2. Análise de fases.....	45
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46

4.1. Caracterização das matérias-primas.....	46
4.1.1. Caracterização do solo.....	46
4.1.1.1. Caracterização química.....	46
4.1.1.3. Caracterização mineralógica.....	49
4.1.2. Caracterização do cimento.....	51
4.1.2.1. Caracterização química.....	51
4.1.2.2. Caracterização mineralógica.....	52
4.1.3. Caracterização do resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC).....	53
4.1.3.1. Caracterização química.....	53
4.1.1.2. Caracterização física.....	55
4.1.2.3. Caracterização mineralógica.....	58
4.1.2.4. Determinação da atividade pozolânica.....	61
4.2. Análise das propriedades das misturas preparadas.....	62
4.2.1. Resistência à compressão.....	62
4.2.2. Absorção de água.....	67
4.2.3. Massa específica aparente.....	70
4.2.4. Variação dimensional.....	72
4.3. Análise microestrutural e de fases das misturas preparadas.....	76
4.3.1. Análise microestrutural.....	76
4.3.2. Análise de fases.....	82
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	84
5.1. Conclusões	84
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

Lista de Figuras

Figura 2.1. Tijolo solo-cimento.	4
Figura 2.2. Fluxograma do processo de fabricação do tijolo solo-cimento (Gomes, 1980).	8
Figura 2.3. Fluxograma das possíveis rotas de contaminação humana pelos materiais e poluentes perigosos na fabricação do cimento (Santi, 2004).	15
Figura 2.4. Resultado do ensaio de absorção de água (Marques et. al., 2012).	22
Figura 2.5. Resultado do ensaio de resistência à compressão (Marques et. al., 2012).	22
Figura 3.1. Fluxograma do procedimento experimental que foi utilizado para produção e caracterização da mistura de solo-cimento.	28
Figura 3.2. Estufa Brasdonto, modelo 3, que foi utilizada para eliminar a umidade residual do solo.	30
Figura 3.3. Peneira Bertel nº 4 ASTM que foi utilizada para peneiramento.	30
Figura 3.4. a) Moinho de bolas Gardelin, modelo 1A, que foi utilizado para conferir a granulometria desejada ao resíduo de CBC; b) copo do moinho de bolas.	32
Figura 3.5. Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova cilíndricos incorporados com resíduo de CBC seguindo os procedimentos da norma ABNT 12024 (1992) – Solo-cimento – Método A.	38
Figura 3.6. Balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II, disponível no LAMAV/CCT/UENF.	39
Figura 3.7. Fluxograma das etapas de produção da mistura para confecção dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC.	40

Figura 3.8. a) Prensa hidráulica METALPEM, modelo PHP 15 t; e b) molde cilíndrico de aço que foram utilizados na moldagem dos corpos de prova.	41
Figura 3.9. Ensaio de resistência à compressão simples realizado em corpos de prova cilíndricos.	43
Figura 4.1. Curva granulométrica do solo utilizado.	48
Figura 4.2. Difratoograma de raios-X do solo: C - Caulinita; G - Gipsita; Go - Goetita; I/M - Ilita/Mica; Q - Quartzo.	50
Figura 4.3. Curvas de análises térmicas diferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG) do solo utilizado.	51
Figura 4.4. Difratoograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS utilizado no trabalho: 1 - Ferroaluminato tetracálcio (C_4AF); 2 - Alita (C_3S); 3 - Carbonato de cálcio; 4 - Belita (C_2S); 5 - Aluminatotricálcio (C_3A); 6 - Óxido de cálcio; 7 - Gipsita ($CaSO_4$).	53
Figura 4.5. Distribuição de tamanho de partícula do resíduo de CBC.	56
Figura 4.6. Morfologia das partículas do pó do resíduo de CBC: a) 40X; b) 100X; c) 150X; e d) 200X.	57
Figura 4.7. Espectro de EDS para a amostra de resíduo de CBC.	58
Figura 4.8. Difratoograma de raios-X para a amostra de resíduo de CBC: Cr - cristobalita; Ck - carbonato de potássio; F- fosfato de cálcio; H - hematita; Q - quartzo; Mu - mulita primária.	59
Figura 4.9. Curva de análise térmica diferencial (ATD) da amostra de resíduo de CBC.	60
Figura 4.10. Curvas de análises termogravimétricas (ATG e DTG) da amostra de resíduo de CBC.	61
Figura 4.11. Resistência à compressão média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.	63

Figura 4.12. Menores valores de resistência à compressão individual versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.	65
Figura 4.13. Absorção de água média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.	67
Figura 4.14. Maiores valores de absorção de água individual obtidos no ensaio versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.	69
Figura 4.15. Massa específica aparente versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos antes da cura e após 28 dias de cura.	71
Figura 4.16. Variação volumétrica versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos.	73
Figura 4.17. Variação linear de altura média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos.	74
Figura 4.18. Variação diametral média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos.	75
Figura 4.19. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 0% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.	77
Figura 4.20. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 10% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.	78
Figura 4.21. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 20% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.	79
Figura 22. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 30% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x; (c) 430x.	80

Figura 4.23. Microestrutura da superfície de fratura das misturas estudadas com aumento de 216x após 28 dias de cura: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30% de resíduo de CBC.81

Figura de 24. Difratoograma de raios-X das mistura incorporadas com: a) 0%; b) 10; c) 20%; e c) 30% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: E – Etringita; K- Caulinita; P – Portlandita; G – Gipsita; Q – quartzo; I/M – Ilita/Mica; At - Aluminato Tricalcio; Sc - Silicato de Cálcio Hidratado; FAT- Ferro Aluminato tetracálcio; A – Alita; Pi – Pirsonita; H – Hematita; ; M – mulita primária; Cr – cristobalita; Ck – carbonato de potássio.83

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Classificação granulométrica das partículas do solo.	11
Tabela 2.2. Composição química do clínquer (ABCP, 2002).....	13
Tabela 2.3. Principais componentes do cimento Portland (Neville, 1997).	14
Tabela 2.4. Composição química de alguns resíduos de CBC encontrados na literatura.	20
Tabela 2.5. Materiais utilizados na preparação dos blocos (Sales et. al., 2012).	23
Tabela 2.6. Análise química do resíduo de CBC utilizado (Sales et. al., 2012).	24
Tabela 2.7. Resultado do ensaio de resistência à compressão dos blocos, aos 28 dias de cura (Sales et. al., 2012).	25
Tabela 2.8. Resultado do ensaio de absorção de água dos tijolos, aos 14 dias de cura (Sales et. al., 2012).	26
Tabela 3.1. Caracterização física do cimento Portland CP III – 40RS.	35
Tabela 3.2. Composição dos traços utilizados na produção dos corpos de prova.	38
Tabela 3.3. Valores exigidos de resistência à compressão e absorção de água para tijolos solo-cimento (NBR 10834, 1994).	42
Tabela 4.1. Composição química do solo usado.	47
Tabela 4.2. Limites de consistência do solo arenoso.	48
Tabela 4.3. Composição química do cimento CP III-40RS utilizado.	52
Tabela 4.4. Composição química do resíduo de CBC.	54

Tabela 4.5. Características relevantes do resíduo de CBC.	55
Tabela 4.6. Valores da condutividade elétrica e índice de atividade pozolânica obtidos utilizando o método de Luxan et al. (1989).	62
Tabela 4.7. Resistência à compressão média dos corpos de prova incorporados com resíduo de casca de ovo após 28 dias de cura.	64
Tabela 4.8. Valores individuais obtidos no ensaio de compressão dos corpos de prova aos 28 dias de cura.	66
Tabela 4.9. Absorção de água média dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC após 28 dias de cura.	68
Tabela 4.10. Maiores valores individuais obtidos no ensaio de absorção de água dos corpos de prova incorporados com resíduo após 28 dias de cura. ..	70
Tabela 4.11. Valores médios de massa específica aparente dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC antes e após os 28 dias de cura.	72
Tabela 4.12. Valores médios da variação dimensional dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC antes e após os 28 dias de cura.	76

Resumo da dissertação apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM TIJOLO SOLO-CIMENTO

Mateus Carvalho Amaral

19 de Fevereiro de 2014

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

Neste trabalho o resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) foi submetido à caracterização tecnológica e avaliado quanto à viabilidade de ser incorporado na composição da mistura solo-cimento, em substituição parcial do cimento, para ser empregado como um novo material cimentício, mais especificamente na fabricação de tijolos solo-cimento. Corpos de prova cilíndricos de solo-cimento, contendo 0 %, 10 %, 20 % e 30 % em peso de resíduo de CBC em substituição ao cimento, e com teor de umidade de 16 %, foram fabricados por prensagem uniaxial. Foi utilizada uma carga de 2 toneladas e os procedimentos descritos na NBR 12024 (1992) – Solo-cimento – Método A. Os corpos de prova obtidos foram submetidos ao processo de cura em câmara úmida por 28 dias. Depois de curados foram caracterizados em termos de resistência à compressão simples, absorção de água, massa específica aparente, variação dimensional e microestrutura. Os resultados mostraram que a incorporação de resíduo de CBC reduziu a resistência à compressão e absorção de água das misturas. Já a densificação da mistura não foi influenciada pela incorporação. Pode ser visto que todos os traços estudados são viáveis para a fabricação do tijolo solo-cimento de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 10834 (1994) - Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. Portanto, a incorporação de resíduo de CBC em mistura solo-cimento é muito atraente para produção de solo-cimento, porque contribui com a diminuição da poluição causada por este abundante resíduo e ainda promove uma redução no custo do produto final.

Abstract of dissertation presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Master Degree in Materials Engineering and Science.

**EVALUATION OF INCORPORATION OF SUGARCANE BAGASSE ASH IN
SOIL-CEMENT BRICK**

Mateus Carvalho Amaral

February 19th, 2014

Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda

In this work the sugarcane bagasse ash was submitted to technological characterization and evaluated for viability to be incorporated into of soil-cement mixture in partial replacement of cement to be used as a new cementitious material, more specifically in the manufacture of soil-cement bricks. Soil-cement cylindrical specimens containing up to 30 wt.% of sugarcane bagasse ash were prepared by uniaxial pressing using a load of 2 tons. The specimens were subjected to a process of curing for 28 days. The cured specimens were characterized in terms of simple compressive strength, water absorption, and apparent specific mass. The results showed that all the studied traces are feasible to manufacturing of soil-cement bricks in according to NBR 10834 Norm criteria – hollow block of soil-cement without structural function. Although the incorporation of sugarcane bagasse ash into soil-cement mixture is very attractive for the manufacturing of soil-cement brick, as well as result in technical benefits, it contributes to reduction of pollution caused by this abundant waste and also promotes a reduction in the cost of the final product.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A crescente necessidade de preservação ambiental e a tendência de escassez dos recursos naturais têm nos forçado a adquirir novos conceitos, onde se buscam soluções técnicas que visem à sustentabilidade de suas atividades (Souza, 2011). Sendo assim, o setor de cerâmica se revela como uma alternativa na busca da valorização e aproveitamento de grande quantidade de materiais descartados, de diversos tipos e origens, quando comparado aos métodos tradicionais. Em muitos casos existe ainda a possibilidade de trazer vantagens técnicas e redução do custo do produto final.

Uma das principais razões que tornam o setor cerâmico atrativo para absorver resíduos poluentes é a disponibilidade da indústria cerâmica, particularmente, o setor de materiais cerâmicos para construção civil. Pode ser dito também que a economia de matérias-primas naturais, as poucas modificações no processo produtivo, a larga variabilidade da composição química e mineralógica e a possibilidade de inertização do resíduo poluente na matriz cerâmica têm contribuído para este cenário (Freire et. al, 2008).

O Brasil é considerado o maior produtor de açúcar e álcool do mundo. A atividade sucroalcooleira tem sido ao longo dos últimos cem anos uma das principais fontes de riqueza da região Norte Fluminense. Porém, o processo produtivo das usinas de álcool e açúcar gera grandes quantidades de bagaço de cana, que geralmente é prensado e queimado pelas usinas na produção de energia. Este processo produz um abundante resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) que muitas vezes é descartado de maneira incorreta no meio ambiente (Paranhos, 2010).

Desta forma, esta dissertação de mestrado analisa a viabilidade de incorporar o resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar numa mistura de solo-cimento, a fim de oferecer mais uma opção de destino final para este resíduo. Além disso, analisa também a viabilidade do uso deste novo material cimentício na fabricação de tijolo solo-cimento.

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a incorporação de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar numa mistura solo-cimento, visando o seu emprego como material cimentício, particularmente em tijolos solo-cimento.

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas;
- b) Preparação de corpos de solo-cimento incorporado com resíduo de cinza de bagaço de cana.
- c) Avaliação do efeito da adição do resíduo nas propriedades tecnológicas do solo-cimento preparado após 28 dias de cura.
- d) Avaliação microestrutural e de fases dos corpos cimentícios curados.

1.3. Justificativas

O tijolo de solo-cimento, que é um material cimentício, foi muito utilizado para a construção em alvenaria, principalmente para a população de mais baixa renda. Um dos motivos é uma significativa redução do custo da obra. Além disso, o tijolo solo-cimento é também chamado de “tijolo ecológico” por não necessitar de queima na sua fabricação. Ainda, este produto apresenta grande capacidade para absorver resíduos sólidos industriais poluentes.

A necessidade de produção de energia a partir de fontes renováveis é cada vez maior em todo mundo. E o Brasil através do Proálcool, Programa Nacional do Álcool, se enquadrou muito bem neste cenário. Este programa representa a iniciativa de maior sucesso mundial, na substituição de derivados de petróleo no setor automotivo, mediante o uso do álcool como combustível nos veículos (Paula et al., 2009). Por consequência, é gerada uma grande quantidade de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, que vem sendo utilizado como adubo nas lavouras.

O uso do cimento é fundamental para o progresso de qualquer país, por ser o principal constituinte do concreto. E o Brasil é o 4º maior consumidor de

cimento do mundo, sendo a região sudeste a maior consumidora (SNIC, 2012). Porém a produção do cimento e a indústria da construção civil causam grandes impactos ambientais e sociais, sendo indispensável buscar alternativas para substituir ou diminuir o uso deste material tão poluente.

A indústria sucroalcooleira gera em média 3,5 milhões de toneladas de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, que pode ser utilizado na fabricação de cimento, argamassas e concreto (Cordeiro, 2009). Portanto, esta dissertação de mestrado, que trata da incorporação do resíduo de CBC em tijolo solo-cimento, espera contribuir para redução do uso do cimento, do consumo dos recursos naturais e dos impactos ambientais causados pelas cimenteiras e pela indústria da construção civil.

CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tijolo solo-cimento

O tijolo solo-cimento é um material cimentício que é definido como um bloco de solo comprimido, obtido pela mistura, em proporção adequada, de solo, cimento e água devidamente prensada.

No Brasil, o solo-cimento foi inicialmente empregado na confecção de bases e sub-bases de pavimentos de estradas. Posteriormente começou a ser utilizado em construções de residências. Em 1949, foi construído o Hospital Adriano Jorge, do Serviço Nacional de Tuberculose, em Manaus, edifício com 10.800 m² ainda em funcionamento (Fiquerola, 2004). A Figura 2.1 apresenta um tijolo do tipo solo-cimento.



Figura 2.1. Tijolo solo-cimento.

Apesar de seu baixo custo e propriedades tecnológicas adequadas, o tijolo solo-cimento somente por volta de 1978 começou a ser amplamente utilizado no Brasil na construção de moradias. Um dos motivos foi que o antigo BNH aprovou o uso desse tipo de tijolo para construção de habitações populares. Na época estudos feitos pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e pelo CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento) comprovaram que, além do bom desempenho termoacústico e de minimizar os danos ambientais, o tijolo de solo-cimento aplicado na

construção de moradias levava a uma redução do tempo e de custos, de 20 % a 40 %, se comparado com a alvenaria tradicional (Fiquerola, 2004).

O tijolo solo-cimento é considerado como ecológico porque sua produção dispensa a etapa de queima, o que elimina o uso de óleo combustível ou madeira. Isto evita a emissão de grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa no ambiente e o desmatamento. Por outro lado, a fabricação de mil tijolos cerâmicos tradicionais consome cerca de 120 kg de óleo combustível ou cinco árvores de médio porte (Fiquerola, 2004). Além disso, por ser utilizado à vista, não é necessário o uso de chapisco, emboço e reboco diminuindo o desperdício de matéria-prima. Ele também possui furos que ficam sobrepostos no assentamento, formando dutos por onde são passados os fios e as tubulações, o que evita rasgos nas paredes, reduzindo o volume de entulho gerado.

O cimento é um dos componentes do tijolo ecológico. Logo não se deve ignorar o alto consumo de energia gasto para a fabricação do cimento, além de suas implicações ambientais. Porém esta energia ainda é inferior a que seria gasta com a queima de tijolos cerâmicos. Além do fato que o cimento é usado em pequenas proporções (Pisani, 2004). Por outro lado, existe a possibilidade que a incorporação de certos resíduos reduza ainda mais a quantidade necessária de cimento na composição deste produto.

A crescente preocupação com o meio ambiente, o fato dos recursos naturais serem finitos, a busca por arquiteturas mais sustentáveis, a possibilidade de reciclagem de resíduos, redução de custos, além de outros fatores, faz com que tijolo solo-cimento venha a ser, cada vez mais, empregado na construção civil.

2.1.1. Aplicações

Os tijolos solos-cimento são principalmente utilizados na construção de moradias. No entanto, a sua aplicação está limitada apenas à criatividade e a necessidade de cada um.

Os tijolos solo-cimento têm sido bastante utilizados na construção de muros com tijolos à vista, porque dispensa chapisco e emboço. A economia de

massa no assentamento e de ferragem reduz significativamente o custo final da obra. Além disso, esses tijolos têm se apresentado como uma opção eficiente, rápida e barata na construção de divisórias, pois esta pode ser construída sem danificar o piso, já que dispensa o alicerce (Fiquerola, 2004).

O ramo de aplicação do tijolo ecológico como móvel tem crescido muito. Tem sido usado para montar camas, mesas, prateleiras, aparadores, bancos, e armários. Os motivos são uma redução do custo e uma vida útil maior do móvel, acrescido ao charme colonial. Ainda, pode ser usado como piso, em passeios, e em jardins, para a fabricação de canteiros e como objeto decorativo (Pisani, 2004).

No meio rural tem sido aplicado na construção de aviários, galpões, celeiros e depósitos, devido aos furos nos tijolos que promovem o isolamento termo-acústico e proteção contra a umidade.

2.1.2. Vantagens

Os tijolos solo-cimento são atrativos para serem utilizados no setor de construção civil por apresentar vantagens como: a) os materiais são de fácil obtenção; b) o sistema construtivo é simples; e c) o investimento em equipamentos é mínimo (CEPED, 1985). Outra vantagem do tijolo solo-cimento é do ponto de vista ecológico, já que o mesmo dispensa a queima, e aliado as suas características promovem uma redução do resíduo de construção, custo, tempo e desperdício de matéria-prima.

Este tipo de tijolo tem se apresentado como uma alternativa de reciclagem para alguns resíduos sólidos poluentes, que quando incorporados a sua composição podem acarretar vantagens técnicas, ambientais e redução do custo final do produto.

Os dois furos no tijolo conferem isolamentos térmico e acústico e proteção contra umidade, pois formam câmaras de ar. Ainda, eles ficam sobrepostos no assentamento, formando dutos, por onde são passados os fios e as tubulações, o que evita rasgos nas paredes, reduzindo o volume de

entulho. Além de dispensar o uso de conduites e caixas de luz, já que as tomadas e os interruptores podem ser fixados diretamente sobre os tijolos. Eles também reduzem o peso da alvenaria, o que resulta num menor dimensionamento das fundações. Além do mais, colunas de concreto não são necessárias em construções de até três andares (Pisani, 2004).

Os tijolos solo-cimento podem ser utilizados para alvenaria com tijolos aparentes, necessitando somente do uso de um impermeabilizante. Dispensando assim o chapisco, emboço e reboco diminuindo o desperdício de matéria-prima, tempo e dinheiro (Pisani, 2004).

O tijolo de solo-cimento pode ser fabricado no próprio canteiro de obras e com o solo da região. Isso leva a redução de gastos com transporte e matéria-prima. Porém, a grande variedade de solos existentes se apresenta como a principal desvantagem desse processo. Por isso deve ser determinada a proporção correta de cada componente do solo-cimento (Fiquerola, 2004).

No passado as amostras de solos eram enviadas para um laboratório e os resultados demoravam em média 40 dias. Hoje novas metodologias, que podem ser aplicadas no próprio canteiro de obras, já foram desenvolvidas, objetivando dispensar a participação dos laboratórios, reduzir o tempo de testes e baratear o processo (Fiquerola, 2004).

2.2. Processo de fabricação do tijolo solo-cimento

O processo de fabricação de tijolos do tipo solo-cimento consiste em uma série de etapas bem definidas, conforme fluxograma mostrado na Figura 2.2.

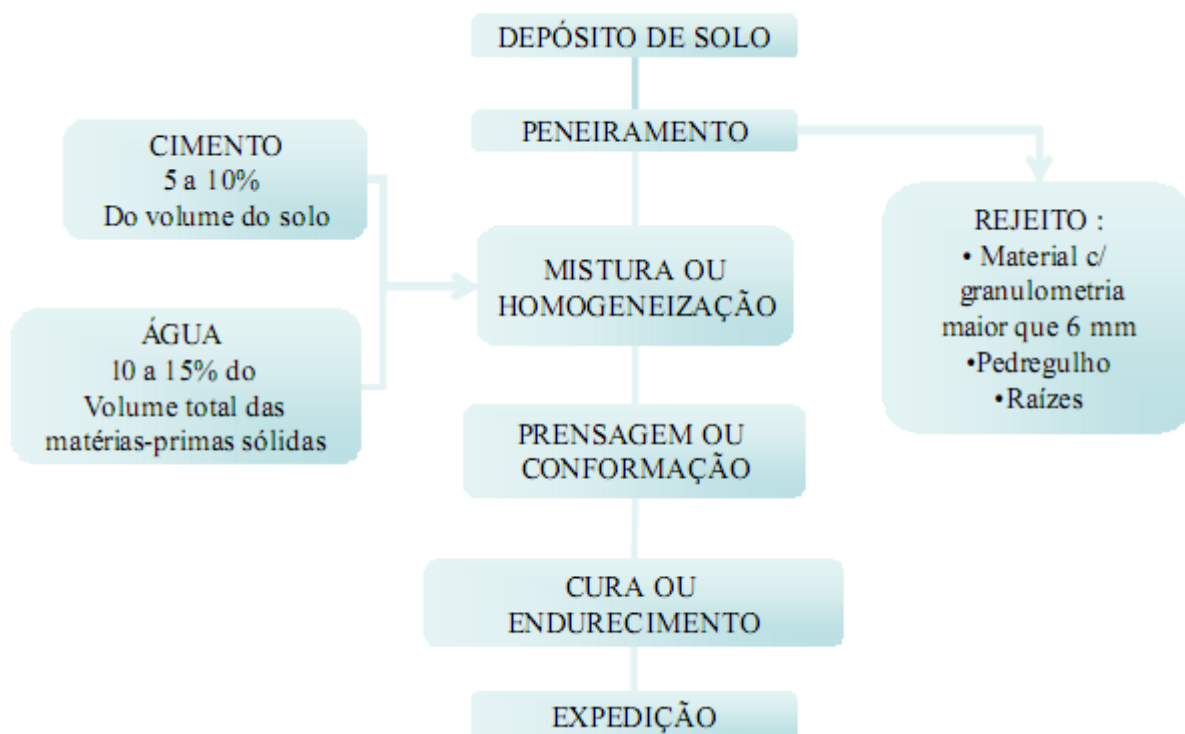


Figura 2.2. Fluxograma do processo de fabricação do tijolo solo-cimento (Gomes, 1980).

A escolha do local da jazida, para a retirada do solo, deve ser estratégica. Quanto mais perto do mercado consumidor menor será o custo final do produto, tornando-o mais competitivo. O solo mais indicado é o predominante arenoso, geralmente entre 50% a 70% do teor areia no composto, pois reduz a quantidade de cimento necessária para sua estabilização. Em caso de solo argiloso poderá ser feita uma correção, utilizando areia pura ou solo arenoso. Ele também deve estar isento de matéria orgânica, porque ela prejudica as propriedades finais do tijolo (Silva, 2005).

No peneiramento, as raízes, os torrões e os pedregulhos são eliminados do solo, conferindo melhor qualidade ao tijolo (Silva, 2005).

Posteriormente é feita a preparação da massa. O solo seco e peneirado é misturado ao cimento até que seja formada uma mistura de coloração uniforme. Somente após este procedimento, a água é adicionada a mistura, que novamente é homogeneizada (Silva, 2005). Esta homogeneização da mistura é essencial para que as propriedades do tijolo sejam iguais em todo o volume (Pisani, 2004).

Essa massa homogênea é colocada no molde da prensa, onde ocorrerá a conformação do tijolo. Nesta etapa, a pressão de compactação deve ser controlada com intuito de otimizar as características do tijolo. Pois quanto maior a compactação da mistura, menor será a quantidade de cimento necessária para que ela desenvolva altas resistências. E ainda garante um melhor acabamento ao tijolo (CEPED, 1999).

Depois ele deve ser estocado, preferencialmente, em um local plano e coberto, se não for possível, é recomendado cobrir o material com uma lona ou similares.

Na etapa de cura, a água é impedida de sair do tijolo solo-cimento por evaporação, permitindo que ocorra o processo de ganho de resistência do material, ou seja, o processo de hidratação do cimento. Para a etapa de cura é recomendado um período mínimo de sete dias, para que a mistura prensada endureça e adquira a resistência desejada. Porém quanto maior o período de cura, melhor serão as propriedades finais do tijolo. Durante este período as peças deverão ser molhadas de duas a quatro vezes ao dia. Em locais descobertos ou regiões muito secas o composto deverá ser molhado mais do que três vezes ao dia (Silva, 2005).

A etapa de cura é fundamental para que o produto apresente boas características. Pois no caso de secagem rápida do tijolo, pode ocorrer: redução na resistência de até 40%, aparecimento de trincas e esfrelamento superficial.

Após o período de cura, a secagem do tijolo ocorrerá em aproximadamente três dias estando finalmente pronto para uso.

2.2.1. Matérias-primas utilizadas

As matérias-primas para confecção do tijolo solo-cimento são basicamente o solo, cimento Portland e água. Estes materiais são abundantes e de fácil aquisição. Neste trabalho o resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar também será usado como uma matéria-prima alternativa em

substituição parcial do cimento. A seguir será feita uma descrição sucinta destes materiais.

2.2.1.1. Solo

O solo é definido como um material não consolidado da camada superficial da crosta terrestre, podendo ser facilmente desagregado. Ele é composto por diversos minerais como: a areia (partículas pequenas e muito resistentes, ou seja, duras); o silte (partículas mais finas que a areia); e as argilas (silicatos hidratados de alumínio, constituintes do barro) (CEBRACE, 1981).

Na composição do tijolo solo-cimento, o solo é o componente que entra em maior proporção. A princípio qualquer solo pode ser utilizado, mas ele deve ser escolhido de modo que a quantidade de cimento necessária para sua estabilização seja a menor possível, reduzindo o custo final do tijolo (Souza et. al, 2008)

O solo vem sendo classificado de diversas maneiras ao longo da história, devido ao seu amplo campo de aplicação e a cada ciência relacionada a ele. Para o uso em tijolo solo-cimento a classificação a ser utilizada é quanto à granulometria.

Na Tabela 2.1 é apresentada a classificação das partículas do solo de acordo com o tamanho.

Tabela 2.1. Classificação granulométrica das partículas do solo.

Classificação	Diâmetro da partícula (mm)
Pedregulho	2 – 76
Areia	0,075 – 2
Areia grossa	0,42 – 2
Areia fina	0,075 – 0,42
Silte	0,005 – 0,075
Argila	Inferior a 0,005

Segundo estudos realizados pelo CEPED (1999), os solos mais apropriados para a fabricação de tijolo solo-cimento são os que possuem teor de areia variando entre 45 e 90%, teor de silte + argila entre 10 e 55%, teor de argila menor que 20% e limite de liquidez menor que 45%. Já a Portland Cement Association (PCA, 1969) considera melhores os solos arenosos e pedregulhosos, contendo de 65 a 90% de areia e teor de silte + argila variando de 10 a 35%. Caso o solo não possua estas características, alguns autores consideram a possibilidade de correção granulométrica do solo, adicionando um solo arenoso ou areia pura, resultando em vantagens técnicas e econômicas (Silva, 2005).

Alguns argilo-minerais, como a montmorilonita, são muito expansivos, então solos argilosos necessitam de uma grande quantidade de cimento para sua estabilização, não sendo viável para fabricação de tijolos (Barbosa e Mattone, 2002). Já o solo arenoso apresenta características mais convenientes para a fabricação do tijolo, pois a sua distribuição granulométrica proporciona uma alta densidade na prensagem da mistura, o que é responsável pelas propriedades finais do tijolo. Isto ocorre porque a areia é um material resistente e inerte, contribuindo assim para uma maior estabilidade e resistência final do produto (SUPERTOR, 198-).

O solo deve, obrigatoriamente, ser isento de matéria orgânica, pois esta interfere na reação de hidratação do cimento, prejudicando a resistência à compressão do solo-cimento. Logo camadas superficiais do solo não podem ser utilizadas, pois é onde há predomínio de matéria orgânica (Silva, 2005).

Para conhecer as propriedades de um determinado solo é necessária a execução de ensaios de caracterização, que são realizados em laboratório, regidos por normas nacionais e estrangeiras (Silva, 2005). Mas muitas das vezes a escolha do solo adequado é feita no local da obra através de ensaios práticos e simples, baseados na consistência e plasticidade de amostras (CEBRACE, 1981).

2.2.1.2. Cimento

Pode se definir o cimento como sendo basicamente um pó fino, com propriedades aglomerantes e que endurece sob a ação de água (Santos, 2004). Se for submetido à ação da água depois de endurecido, o cimento Portland não se decompõe novamente.

A busca por um material que oferecesse segurança e durabilidade às construções vem desde o Egito antigo. Essa busca foi incessante até que por volta de 1756, na Inglaterra, Smeaton descobriu um material, uma mistura calcinada de calcário e argila, que endurecia na presença de água, e que um pouco mais tarde veio a ser batizada de Cimento Portland (Santos, 2004).

A evolução do cimento ocorreu de acordo com a necessidade do homem, que com o emprego de aditivos, aumentou o seu campo de aplicação e melhorou suas propriedades. Atualmente ele é normalizado e existem onze tipos diferentes de cimento.

O cimento comum é um pó fino composto de 96% de clínquer e 4% gesso. A composição do clínquer é aproximadamente 80% de carbonato de cálcio (CaCO_3), 15% de dióxido de silício (SiO_2), 3% de óxido de alumínio (Al_2O_3), e outros, como óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de magnésio (MgO) e anidrido sulfúrico (SO_3), em menores quantidades (Santos, 2004). O anidrido

sulfúrico é adicionado após o a calcinação a fim de retardar o tempo de pega do produto (Peruzzi, 2002).

Na Tabela 2.2 é apresentada a composição química do clínquer segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Tabela 2.2. Composição química do clínquer (ABCP, 2002).

Óxido	Teor (%)
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0,5 – 0,6
MgO	0,5 – 4,0
Álcalis	0,3 – 1,2
SO ₃	2,0 – 3,5

No processo de fabricação do cimento Portland são utilizados como matérias-primas materiais calcários, como gesso, alumina e sílica. A fabricação consiste na moagem, mistura, em proporções definidas destes materiais, e sinterização numa faixa de 1450 °C, em um forno rotativo. Onde é obtido o clínquer na forma de pelotas que depois é resfriado e moído resultando em um pó fino (< 75 µm) que com adição de gesso gera o cimento Portland (Neville, 1997).

A sinterização é responsável por gerar os principais componentes do cimento, que quando hidratados são responsáveis pelas propriedades deste material (Neville, 1997). Na Tabela 2.3 são apresentados estes compostos.

Tabela 2.3. Principais componentes do cimento Portland (Neville, 1997).

Nome	Composto	Abreviação	Teor (%)
Silicato tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	42 - 60
Silicato dicálcio	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	14 - 35
Aluminato tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 - 13
Ferroaluminato tetracálcio	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 - 10
Gesso	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	CSH_2	1 - 4

Notação: CaO - C; SiO_2 - S; Al_2O_3 - A; Fe_2O_3 - F; SO_3 - S; H_2O - H.

O uso do cimento se tornou indispensável para o progresso de qualquer país, por ser o constituinte principal do concreto, que por sua vez, é o segundo material mais consumido no planeta. Por isso a maior parte da produção e consumo ocorre em países em desenvolvimento. Em 2004, o Brasil já estava entre os dez maiores produtores de cimento do mundo, sendo a região sudeste a maior produtora (Carvalho, 2008). Em 2012 o país ocupou a 4ª posição do ranking de consumo de cimento mundial e com perspectiva para 2013 de ocupar a 3ª posição (SNIC, 2012).

A fabricação do cimento implica em grandes impactos ambientais e sociais. Sendo apontada como responsável pela emissão mundial de aproximadamente 3% de gases de efeito estufa e por 5% de gás carbônico (CO_2), que é o principal responsável pelo aquecimento global (Rosenthal, 2004). As cimenteiras estão ainda entre as maiores fontes de emissão de poluentes atmosféricos perigosos do globo, como as dioxinas e os furanos, metais tóxicos (mercúrio, chumbo, arsênio e outros), os produtos de combustão incompleta e os ácidos halogenados (Carvalho, 2008).

Na Figura 2.3 está apresentado um esquema de possíveis maneiras de contaminação do homem pelos materiais poluentes produzidos pelas fábricas de cimento (Carvalho, 2008).

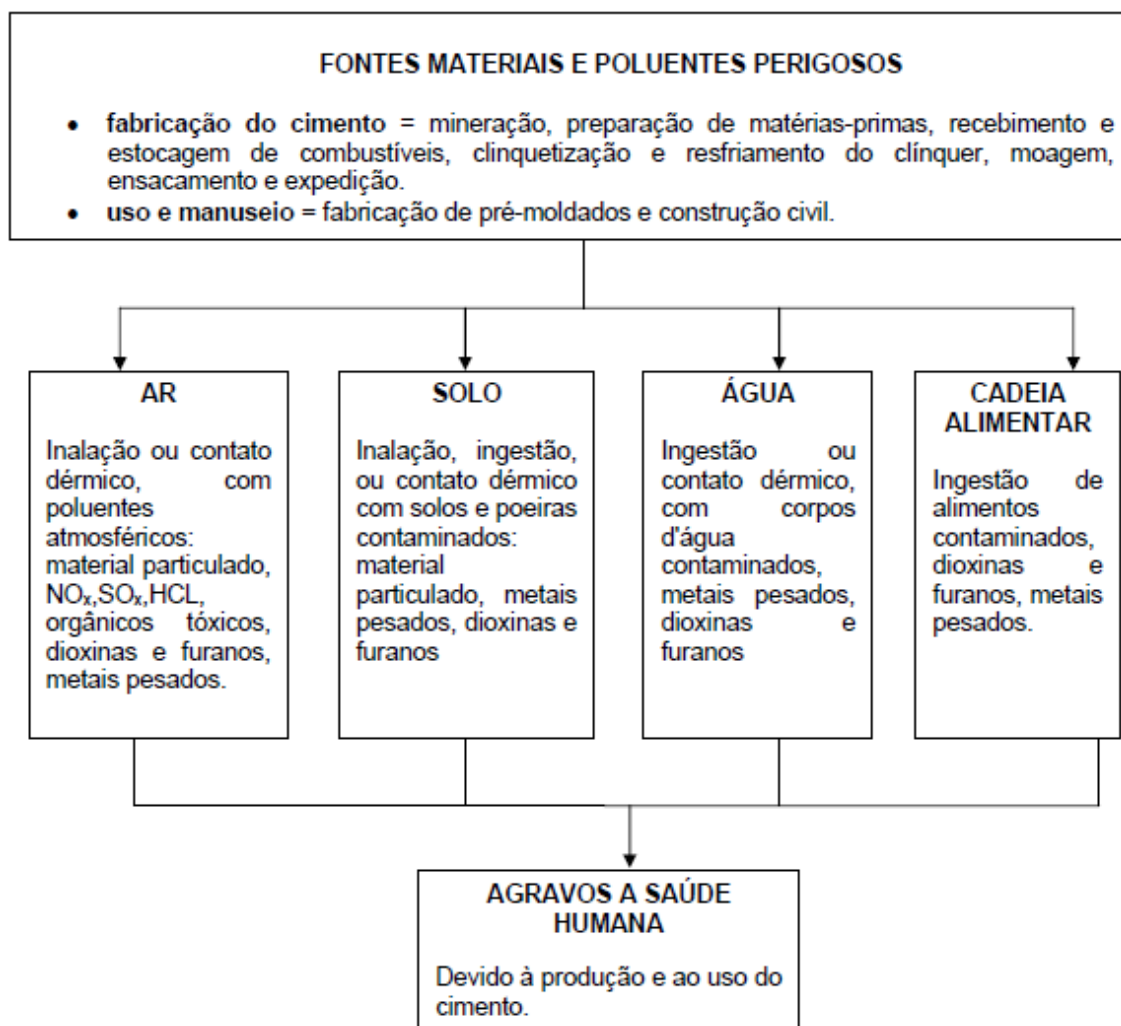


Figura 2.3. Fluxograma das possíveis rotas de contaminação humana pelos materiais e poluentes perigosos na fabricação do cimento (Santi, 2004).

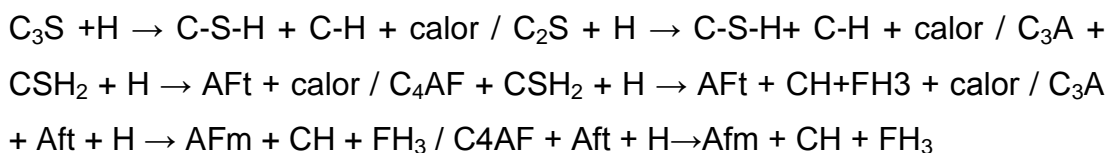
Devido à atual e crescente preocupação do homem com a escassez dos recursos naturais e o meio ambiente, cada vez mais é necessário à busca por soluções que minimizem os impactos ambientais causados pelas cimenteiras e materiais que possam substituir ou diminuir o uso de cimento. Logo este trabalho se mostra em plena sintonia com estas diretrizes, já que o tijolo solo-cimento em sua fabricação não emite gases poluentes, porque dispensa a etapa de queima, e ainda a incorporação do resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode diminuir a quantidade de cimento necessária em sua composição.

2.2.1.2.1. Processos químicos de hidratação do cimento

Os silicatos e aluminatos, da Tabela 2.3, na presença de água formam produtos de hidratação que, com o passar do tempo, resultam na massa de cimento endurecida (Mehta e Monteiro, 1994). Os principais produtos são: o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), 50 a 60% do volume de sólidos, hidróxido de cálcio ou Portlandita (C-H), 20 a 25% do volume, e os sulfoaluminatos, 15 a 20% do volume. Sendo assim, a reação de hidratação do cimento pode ser representada simplificada (Faria *et al.*, 2004):



Mas na verdade a reação de hidratação é uma composição das várias reações apresentadas abaixo (Faria *et al.*, 2004):



onde:

AFt = etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$); e

AFm = monossulfato de cálcio hidratado.

O silicato tricálcio (C_3S), também conhecido como Alita é hidratado rapidamente, em poucas horas, libera uma média quantidade de calor e gera um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-H). A portlandita gerada, nesta reação, é responsável pela resistência mecânica nas primeiras idades da pasta (Neville, 1997).

Enquanto o silicato dicálcio (C_2S), também conhecido como Belita, é hidratado lentamente, libera uma pequena quantidade de calor e resulta em um volume menor de portlandita, quando comparado com o C_3S . A portlandita gerada, nesta reação, é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas de cura (Peruzzi, 2002).

Já o aluminato tricálcio (C_3A), conhecido como Aluminato, é responsável pelas primeiras reações de hidratação, cristalizando em poucos minutos, libera

uma grande quantidade de calor e forma aluminatos hidratados que contribuem para a resistência mecânica no primeiro dia (Neville, 1997).

O ferroaluminato tetracálcio (C_4AF) também é hidratado rapidamente, libera uma média quantidade de calor, porém inferior a liberada pelo C_3S , e a resistência mecânica da pasta quase não é influenciada por ela, independente da idade (Grande, 2003).

2.2.1.3. Água

Pode ser dito que a água é uma substância insípida, inodora e incolor, e que em temperatura ambiente, é encontrada no estado líquido (Zampieron, 2010).

Ela entra em pequenas proporções na mistura do solo cimento, com o objetivo de conferir plasticidade e resistência mecânica suficiente ao solo. Isto torna possível a conformação e manuseio da mistura, antes do endurecimento (Silva, 2005).

Para ser usada como matéria-prima na fabricação do tijolo solo-cimento, a água deve apresentar certas características como: ser potável, isenta de matéria orgânica em suspensão e livre de sais que interfiram na reação de endurecimento do tijolo. (SUPERTOR, 198-; Gomes, 1980).

A água é um recurso natural renovável e abundante em nosso planeta, e o Brasil possui aproximadamente 12% de toda água doce do mundo. Mas os processos de urbanização, industrialização, produção agrícola, aliado ao desperdício vem mudando este quadro e a falta d'água, que parecia ser um problema do futuro, já atinge mais de 29 países como a China, a Índia, o Oriente Médio e o norte da África (Zampieron, 2010).

Para amenizar este cenário é necessária uma conscientização da população com relação ao uso correto da água, um investimento maior em saneamento por parte dos governantes e buscar atividades mais sustentáveis (Zampieron, 2010).

Na fabricação do tijolo solo-cimento não é produzido nenhum efluente que possa causar dano ao meio ambiente, contribuindo para que este produto esteja em conformidade com a crescente preocupação de preservação ambiental.

2.2.2. Propriedades tecnológicas

O tijolo solo-cimento possui algumas características atrativas que contribuem para o aumento do seu emprego na indústria da construção civil, tais como:

- Elevada resistência à compressão $\geq 2,0$ MPa;
- Baixa capacidade de absorção de água $\leq 20\%$;
- Baixa retração volumétrica;
- Elevada resistência à erosão e intempéries, quando impermeabilizado adequadamente;
- Bom isolamento termo-acústico;
- Completamente incombustíveis (Silva, 2005).

Quando é feita uma comparação entre o tijolo solo-cimento e os similares de barro queimado pode ser visto que o tijolo solo-cimento apresenta as seguintes características:

- Maior resistência à compressão;
- Menor capacidade de absorção de água;
- Maior padronização de formas e dimensões (Gomes, 1980).

2.3. Resíduo de cinza de bagaço de cana-de-áçúcar (CBC)

A cana-de-açúcar é um produto produzido em mais de 130 países e no Brasil é cultivada em mais de 8,5 milhões de hectares. O estado de São Paulo

é o maior produtor, responsável por 51,66% da área total de cultivo, seguido por Minas Gerais com 8,54%. Porém a maior expansão da área plantada com cana-de-açúcar foi notada na região Sudeste, responsável por 96,38% do total da área nova agregada, o que representa 3,57 mil hectares acrescentado à área já existente (Conab, 2012).

A produção de açúcar em 2012 no Brasil foi estimada em 38,85 milhões de toneladas e a de etanol em 23,96 bilhões de litros, sendo 9,74 bilhões de litros de etanol anidro e 14,21 bilhões de litros de etanol hidratado (Conab, 2012).

O bagaço, gerado durante a extração do caldo na moagem da cana-de-açúcar, constitui-se o maior resíduo da agricultura brasileira (Moreira e Goldemberg, 1999). Para cada tonelada de cana-de-açúcar, são gerados cerca de 260 kg de bagaço com 50% de umidade (Cortez et al., 1992).

O bagaço da cana-de-açúcar é uma biomassa de suma importância para produção de energia. Aproximadamente 95% de todo o bagaço produzido no Brasil são queimados em caldeiras para este fim. A queima produz uma cinza residual, que corresponde a cerca de 0,62% do total de cana moída (Souto, 2010).

Na safra de 2012/2013 a estimativa total de cana moída foi de 602,2 milhões de toneladas o que resulta em torno de 3,73 milhões de toneladas de resíduo de cinzas, que geralmente é empregada como adubo nas próprias lavouras, mesmo sendo um resíduo de difícil degradação e com poucos nutrientes minerais (Conab, 2012).

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar é um material rico em sílica, óxido de silício (SiO_2), com teor acima de 60% em massa, e possui outros óxidos em pequenas proporções como por exemplo: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO e outros, cujo o teor pode variar de acordo com o tipo de cana-de-açúcar cultivada, fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais, tais como clima, solo e água (Cordeiro, 2009). Na Tabela 2.4 é apresentada a composição química de alguns resíduos de CBC encontrados na literatura.

Tabela 2.4. Composição química de alguns resíduos de CBC encontrados na literatura.

Óxido	Teixeiras et. al. (2008)	Borlini et. al. (2006)	Freitas (2005)
SiO ₂	85,58	77,5	83,1/65,7
Al ₂ O ₃	5,25	4,70	5,1/13,8
Fe ₂ O ₃	1,31	3,80	2,6/4,1
SO ₃	-	-	-
TiO ₂	0,32	0,30	-
P ₂ O ₅	0,54	2,30	-
CaO	2,08	2,30	1,9/3,5
MnO	0,08	0,30	-
K ₂ O	3,46	5,40	4,5/8,1

A grande quantidade de sílica encontrada no resíduo pode ser proveniente de duas fontes:

- Absorção do silício do solo pelas raízes na forma de ácido monossílico (H₄SiO₄) e, após a saída da água das plantas por transpiração, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel; e
- Da areia (quartzo) da lavoura, que não foi completamente retirada durante a etapa de lavagem, no processamento da cana-de-açúcar. Ela permanece no bagaço e pode ser vista nas operações de limpeza dos salões das caldeiras (Souto, 2010).

Devido a essa alta concentração de sílica e outros óxidos, o resíduo de CBC e outras cinzas agroindustriais podem ser utilizadas como pozolana. As pozolanas possuem capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de

poder aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (Oliveira et al., 2004).

Desta maneira, o resíduo de CBC pode ser utilizado como substituto da pozolana na fabricação de concreto e argamassas. E também, como matéria-prima para produção de cimento Portland (Cordeiro, 2009). Isto resulta na redução dos impactos ambientais causados pelas cimenteiras e pela indústria da construção civil, que se apresenta como a maior consumidora de recursos naturais e geradora de resíduos do planeta (Gaede, 2008).

O Brasil gera aproximadamente 3,5 milhões de toneladas por ano de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, que pode abastecer parcialmente a indústria da construção civil, resultando em vantagens econômicas e ambientais (Cordeiro, 2009).

A idéia de incorporar o resíduo de CBC em tijolo solo-cimento surgiu com o intuito de reduzir a quantidade de cimento necessária para a estabilização do tijolo, a partir do conhecimento prévio da composição do cimento e do resíduo de CBC.

2.3.1. Incorporação de resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em tijolo solo-cimento

A incorporação de resíduos sólidos poluentes em tijolo solo-cimento vem sendo alvo de muitas pesquisas, e devido a abundante quantidade e características do resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, a incorporação deste resíduo em tijolos solo-cimento vem sendo tema de muitas delas.

Marques et.al. (2012) estudaram a incorporação do resíduo de CBC de Rio Largo/AL em tijolos solo-cimento em substituição parcial do cimento. Foi utilizado um traço de referência sem adição de cinzas e com 14% de cimento em relação à massa total e traços com 2%, 4% e 6% de resíduo de CBC. Os tijolos foram ensaiados aos 7 e 14 dias de cura.

Nas Figuras 2.4 e 2.5 estão apresentados os resultados encontrados nesta pesquisa.

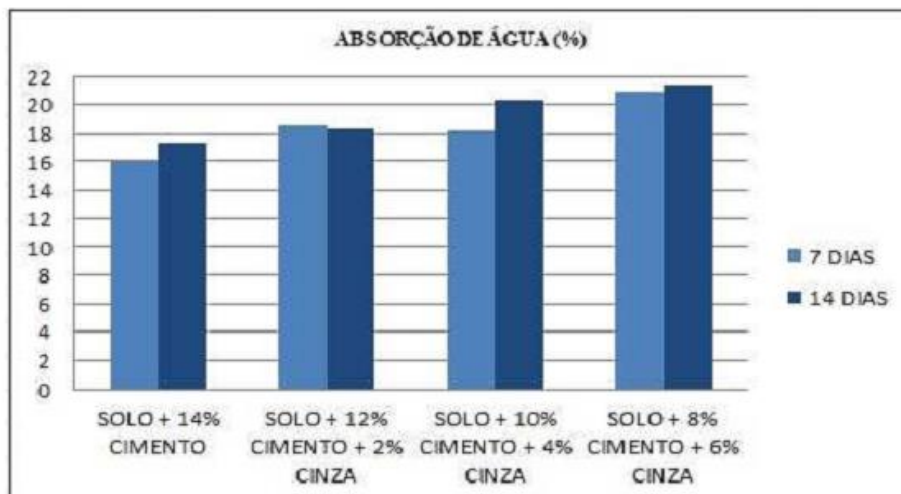


Figura 2.4. Resultado do ensaio de absorção de água (Marques et. al., 2012).

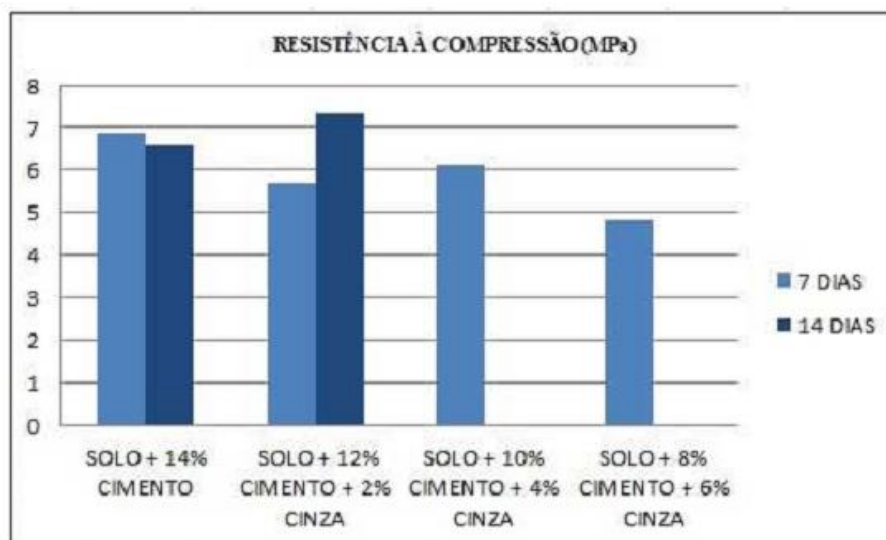


Figura 2.5. Resultado do ensaio de resistência à compressão (Marques et. al., 2012).

Os resultados mostraram, de uma forma geral, uma redução na resistência à compressão e um aumento da absorção de água dos tijolos de

acordo com o aumento da porcentagem do resíduo de CBC. Todos os traços estudados apresentaram valores de resistência à compressão acima do mínimo médio exigido (≥ 2 MPa) pela norma ABNT NBR 8491 (2012). Porém os resultados de absorção de água dos traços incorporados com 4 % e 6% de cinza estão acima do máximo médio estabelecido (≤ 20 %) pela norma ABNT NBR 8491 (2012). Sendo assim apenas os traços de referência (0 % de cinza) e o com 2% de adição de cinza podem ser utilizados para a fabricação de tijolos solo-cimento.

Sales et.al. (2012) avaliaram as propriedades de tijolos solo-cimento incorporados com resíduo de CBC de São Carlos/SP, usando as formulações apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Materiais utilizados na preparação dos blocos (Sales et. al., 2012).

Série	Teor de cimento em massa (%)	Proporção dos materiais em massa (%)			Teor de água em massa (%)
		Solo	Cimento	CBC	
CP6 - C0	6	1,00	0,06	0,00	10,85
CP6 - C2				0,02	10,88
CP6 - C4				0,04	11,36
CP6 - C8				0,08	11,40
CP12 - C0	12	1,00	0,12	0,00	12,72
CP12 - C2				0,02	12,81
CP12 - C4				0,04	12,84
CP12 - C8				0,08	13,33

A caracterização química do resíduo de CBC empregado é apresentada na Tabela 2.6.

Tabela 2.6. Análise química do resíduo de CBC utilizado (Sales et. al., 2012).

Óxido	Teor (%)
SiO ₂	96,2
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	1,9
K ₂ O + NaO*	0,3
CaO	0,1
P ₂ O ₅	0,1
MgO	0,1
SO ₃	0,1
PF**	1,04

*teor de álcalis; **PF = Perda ao fogo

Após 28 dias de cura, foi realizado o ensaio de resistência à compressão e foi verificado que nos corpos de prova (CP6) fabricados com 6% de cimento, o aumento da quantidade de resíduo de CBC promoveu um ganho relevante na resistência máxima à compressão dos tijolos, mas não atingiram o valor mínimo de 2 MPa, exigido pela norma NBR 8491 (2012), aos 28 dias. Já os tijolos confeccionados com 12% de cimento apresentaram um pequeno decréscimo na resistência à compressão quando comparados com o traço de referência (CP12-C0). Porém o aumento da adição do resíduo de CBC quase não promoveu alteração nesta propriedade.

Na Tabela 2.7 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão da pesquisa de Sales et. al (2012).

Tabela 2.7. Resultado do ensaio de resistência à compressão dos blocos, aos 28 dias de cura (Sales et. al., 2012).

Série	Resistência à Compressão (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
CP6 - C0	0,70	0,08	11,16
CP6 - C2	0,92	0,19	20,67
CP6 - C4	1,44	0,15	10,36
CP6 - C8	1,54	0,16	10,16
CP12 - C0	3,13	0,21	6,63
CP12 - C2	2,77	0,11	3,81
CP12 - C4	2,62	0,10	3,72
CP12 - C8	2,89	0,11	3,81

O teste de absorção de água foi realizado após 14 dias de cura e foi observado que os valores encontrados no ensaio de absorção de água quase não sofreram alteração com o aumento da quantidade de resíduo de CBC empregado na formulação dos tijolos para as duas séries. E também que estes valores se encontram abaixo do valor máximo de 20% em média permitido pela norma NBR 8491 (2012).

Na Tabela 2.8 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de absorção de água dos tijolos após 14 dias de cura.

Tabela 2.8. Resultado do ensaio de absorção de água dos tijolos, aos 14 dias de cura (Sales et. al., 2012).

Série	Absorção (%)	DP ¹	CV ² (%)	Massa específica seca (kg/m ³)	DP ¹	CV ² (%)
CP6 - C0	12,41	0,33	2,64	1927,3	40,77	2,12
CP6 - C2	12,61	0,52	4,14	1951,3	8,33	0,43
CP6 - C4	13,79	0,31	2,30	1991,0	16,86	0,85
CP6 - C8	11,86	0,25	2,15	2021,0	44,23	2,19
CP12 - C0	11,94	0,52	4,35	2017,0	98,20	4,87
CP12 - C2	12,20	0,41	3,36	2006,3	65,03	3,24
CP12 - C4	11,57	0,10	0,84	2033,0	30,05	1,48
CP12 - C8	12,11	0,35	2,85	2041,0	22,91	1,12

1 – Desvio padrão; 2 – Coeficiente de variância.

Como foi dito anteriormente o resíduo de CBC pode ter diferentes características dependendo do tipo de cana, solo e adubo utilizados. Foi visto que o resíduo de CBC da região de Campos dos Goytacazes/RJ ainda não foi avaliado quanto a sua viabilidade de ser incorporado em tijolos solo-cimento. Sendo assim esta dissertação espera contribuir com um estudo abrangente sobre os efeitos deste resíduo nas propriedades tecnológicas do tijolo, realizar análise microestrutural e de fases dos corpos de prova curados, e ainda contribuir com uma disposição ambientalmente correta para este abundante resíduo.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento de mistura de solo-cimento incorporada com o resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma das etapas envolvidas neste trabalho de dissertação de mestrado.

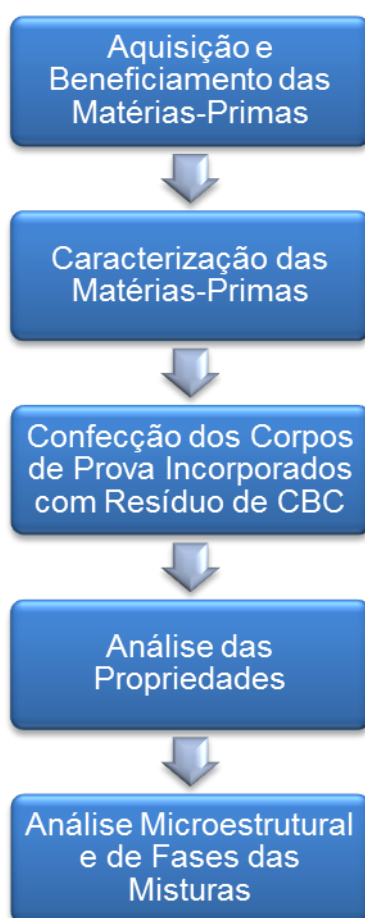


Figura 3.1. Fluxograma do procedimento experimental que foi utilizado para produção e caracterização da mistura de solo-cimento.

3.1. Aquisição e beneficiamento das matérias-primas

As matérias-primas que foram utilizadas neste trabalho são:

1. Solo Arenoso;
2. Cimento Portland do tipo CP III – 40RS;
3. Água; e
4. Resíduo de CBC.

3.1.1. Solo

O solo arenoso foi coletado na empresa Artecercâmica Sardinha, localizada na região de Campos dos Goytacazes-RJ. O solo foi submetido ao processo de secagem, onde primeiramente foi posto para secar ao ar livre (sol) durante uma semana. E Depois colocado, em proporções adequadas, em uma estufa (Figura 3.2) a 105 °C, durante 24 horas, a fim de eliminar a umidade residual.



Figura 3.2. Estufa Brasdonto, modelo 3, que foi utilizada para eliminar a umidade residual do solo.

Após secagem, o solo foi submetido ao processo de peneiramento, onde foi peneirado para a fração < 4,0 mesh, utilizando a peneira nº 4 ASTM (4,75 mm) (Figura 3.3).



Figura 3.3. Peneira Bertel nº 4 ASTM que foi utilizada para peneiramento.

O solo beneficiado foi armazenado em uma embalagem plástica devidamente tampada, objetivando evitar a absorção de umidade.

3.1.2. Cimento

O cimento Portland utilizado neste trabalho é do tipo CP III – 40RS, que além de gesso, recebe de 25 a 65 % de escória. Este tipo de cimento pode ser utilizado para fabricação da mistura solo-cimento, pois propicia condições favoráveis para obtenção da resistência mecânica adequada da mistura (ABCP, 2002).

O cimento foi retirado de sua embalagem e disposto em um pote plástico, devidamente tampado, a fim de evitar a absorção de umidade, por consequência, a degradação de suas propriedades.

3.1.3. Água

Neste trabalho foi utilizada água potável coletada normalmente da rede de distribuição de água do município de Campos dos Goytacazes-RJ, fornecida pela Companhia Águas do Paraíba.

3.1.4. Resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC)

O resíduo de CBC utilizado neste trabalho foi coletado como rejeito da usina Sapucaia, indústria de açúcar e álcool localizada na região de Campos dos Goytacazes-RJ. Após a coleta, o resíduo de CBC in natura foi submetido ao processo de beneficiamento.

Inicialmente foi posto na estufa (Figura 3.2) a 105 °C durante aproximadamente 60 minutos para eliminar a umidade residual e evitar a sua deterioração.

Em outra etapa, o resíduo seco foi submetido ao processo de cominuição através de um moinho de bolas Gardelin, modelo 1A (Figura 3.4), pelo período de 3 horas.



Figura 3.4. a) Moinho de bolas Gardelin, modelo 1A, que foi utilizado para conferir a granulometria desejada ao resíduo de CBC; b) copo do moinho de bolas.

Finalmente o resíduo de CBC cominuído foi submetido ao peneiramento a fração < 200 mesh, utilizando a peneira nº 200 ASTM (75 µm).

Após o beneficiamento, o resíduo de CBC foi armazenado em um pote plástico devidamente tampado a fim de evitar a absorção de umidade e deterioração de suas propriedades.

3.2. Caracterização das matérias-primas

3.2.1. Caracterização do solo

3.2.1.1. Caracterização química

A composição química do solo foi determinada em termos de óxidos via a técnica de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX) com o auxílio do EDX-700, marca Shimadzu, perda ao fogo a 1000 °C, e teor de matéria orgânica.

A perda ao fogo (PF) foi determinada de acordo com a seguinte expressão:

$$PF (\%) = [(M_S - M_c) / M_S] 100 \quad (3.1)$$

onde:

M_S = massa da amostra seca a 110 °C (g);

M_c = massa da amostra calcinada a 1000 °C por 2 horas (g);

3.2.1.2. Caracterização física

Foi realizada a análise do tamanho de partícula utilizando os procedimentos de peneiramento/sedimentação de acordo com NBR 7181 (1988). E picnometria para determinar a massa específica real dos grãos seguindo os procedimentos da NBR 6508 (1984).

As propriedades plásticas (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) foram determinadas de acordo com a NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1988). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg foi calculado utilizando a expressão (3.2):

$$IP = LL - LP \quad (3.2)$$

onde:

IP = índice de plasticidade;

LL = limite de liquidez;

LP = limite de plasticidade.

Estes parâmetros expressam as condições de trabalhabilidade do solo. O limite de plasticidade (LP) expressa a quantidade de água mínima necessária para que o estado plástico seja adquirido. E o limite de liquidez (LL) a quantidade de água mínima para que o material atinja uma consistência de lama (Siqueira, 2013).

3.2.1.3. Caracterização mineralógica

Foi determinada via difração de raios-X (DRX), com o auxílio do difratômetro XRD-7000 de fabricação SHIMADZU. As fases cristalinas foram identificadas utilizando as fichas padrão JCPDS. Também foram feitas análises térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (TG/DTG), sendo realizadas em um analisador simultâneo ATG-ATD, marca Shimadzu, modelo DTG-60H. O ensaio foi realizado sob atmosfera de nitrogênio, em que a temperatura variou de 28° C até 1000° C, com uma taxa de aquecimento de 10° C/min durante 30 minutos.

3.2.2. Caracterização do cimento

3.2.2.1. Caracterização química

A composição química do foi determinada em termos de óxidos via a técnica de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX) com o auxílio do EDX-700, marca Shimadzu, perda ao fogo a 1000 °C, e teor de matéria orgânica. A perda ao fogo (PF) foi determinada de acordo com a expressão 3.1.

3.2.2.2. Caracterização física

Parte da caracterização do cimento utilizado foi fornecida pelo fabricante e estão apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Caracterização física do cimento Portland CP III – 40RS.

Ensaio	Norma	Resultado
Superfície específica Blaine	NBR NM 76/1998	400 m ² /Kg
Água de pasta de consistência Normal	NBR NM 43/2003	31,1 %
Tempo de início de pega	NBR NM 65/2003	250 min
Tempo de fim de pega		300 min
Finura na #200	NBR 11579/1991	0,10 %
Resistência à compressão axial	NBR 7215/1996	3 dias – 17 Mpa
		7 dias – 30 Mpa
		28 dias – 45 Mpa
Massa específica	NBR NM 23/2001	2,98 g/cm ³

3.2.2.3. Caracterização mineralógica

Foi determinada via difração de raios-X (DRX), com o auxílio do difratômetro XRD-7000 de fabricação SHIMADZU. As fases cristalinas foram identificadas utilizando as fichas padrão JCPDS. Também foram feitas análises térmicas diferencial (ATD) e termogravimétrica (TG/DTG), sendo realizadas em um analisador simultâneo ATG-ATD, marca Shimadzu, modelo DTG-60H. O ensaio foi realizado sob atmosfera de nitrogênio, em que a temperatura variou de 28° C até 1000° C, com uma taxa de aquecimento de 10° C/min durante 30 minutos.

3.2.3. Caracterização do resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC)

3.2.3.1. Caracterização química

A composição química do resíduo foi determinada em termos de óxidos via a técnica de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX) com o auxílio do EDX-700, de fabricação da SHIMADZU, perda ao fogo a 1000 °C, teor de umidade e teor de matéria orgânica.

3.2.3.2. Caracterização física

Foi analisado o tamanho de partícula (procedimentos de peneiramento/sedimentação de acordo com a NBR 7181 (1988)), a morfologia através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura SUPERSCAN SS-550, de fabricação SHIMADZU, disponível no LAMAV/UENF e massa específica real por picnometria.

3.2.3.3. Caracterização mineralógica

Foi determinada via difração de raios-X (DRX), com o auxílio do difratômetro XRD-7000 de fabricação SHIMADZU. As fases cristalinas foram identificadas utilizando as fichas padrão JCPDS.

A fim de se obter um melhor resultado foram realizadas análises térmicas. A análise térmica diferencial (ATD) foi realizada com auxílio do analisador térmico ATA 50H, de fabricação da SHIMADZU. Este ensaio foi realizado a partir da temperatura ambiente (~25 °C) até cerca de 1150 °C, utilizando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de ar. A análise termogravimétrica (ATG) e derivativa termogravimétrica (DTG) foram realizadas com auxílio do analisador térmico ATA 51H, de fabricação da SHIMADZU, utilizando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de ar.

3.2.3.4. Determinação da atividade pozolânica

Foi determinada a atividade pozolânica de acordo com o método proposto por Luxan et al. (1989). Esta propriedade é determinada através da variação da condutividade elétrica de uma solução saturada, contendo 2 g de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e 200 ml de água destilada, antes e 120 segundos após 5g da pozolana, neste caso o resíduo de CBC, ter sido adicionada e agitada continuamente na solução a uma temperatura de 40 °C.

Sendo assim é possível classificar o material como:

- Sem atividade pozolânica: < 0,4 $\mu\text{S/cm}$.
- Com atividade pozolânica moderada: entre 0,4 $\mu\text{S/cm}$ e 1,2 $\mu\text{S/cm}$.
- Com boa atividade pozolânica: > 1,2 $\mu\text{S/cm}$.

3.3. Confeção dos corpos de prova incorporados com resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC)

Os corpos de prova cilíndricos incorporados com diferentes proporções de resíduo de CBC foram obtidos por prensagem uniaxial e sendo feita uma adaptação da norma ABNT 12024 (2012) – Solo-cimento – Método A.

As matérias-primas utilizadas foram: Cimento Portland CP III – 40RS, solo arenoso, resíduo de CBC e água.

3.3.1. Traços estudados

A Tabela 3.2 apresenta a composição dos traços estudados. Foi utilizada uma mistura de solo-cimento padrão (traço A_0) constituído de nove partes de solo para uma de cimento (9:1). O resíduo de CBC foi usado em substituição parcial ao cimento Portland nas proporções de 10 % (traço A_{10}), 20 % (traço A_{20}) e 30 % (traço A_{30}).

As misturas de solo-cimento foram umedecidas com 16% de água em relação à massa total (192 g). Estudos realizados por Amaral et. al (2011) mostraram que, para o mesmo solo utilizado neste trabalho, este teor de umidade proporciona propriedades mais favoráveis para a fabricação de tijolos solo-cimento.

Tabela 3.2. Composição dos traços utilizados na produção dos corpos de prova.

Traço	Solo (g)	Cimento (g)	Resíduo (g)	Total (g)
A_0	1080	120	0	1200
A_{10}	1080	108	12	1200
A_{20}	1080	96	24	1200
A_{30}	1080	84	36	1200

Para cada traço foram fabricados 10 corpos de prova e na figura 3.5 é apresentado um fluxograma das etapas envolvidas na fabricação destes corpos de prova. Em seguida é feita uma descrição sucinta destas etapas.



Figura 3.5. Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova cilíndricos incorporados com resíduo de CBC seguindo os procedimentos da norma ABNT NBR 12024 (2012) – Solo-cimento – Método A.

3.3.1.1. Preparação da mistura

Inicialmente foi realizada a pesagem das matérias primas beneficiadas com o auxílio de uma balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II (Figura 3.6), disponível no LAMAV/UENF.



Figura 3.6. Balança digital marca Gehaka, modelo BG-2000 Classe II, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

Na Figura 3.7 é mostrada a seqüência de etapas para produção da mistura para confecção dos corpos de prova. Abaixo é feita uma descrição dos procedimentos.

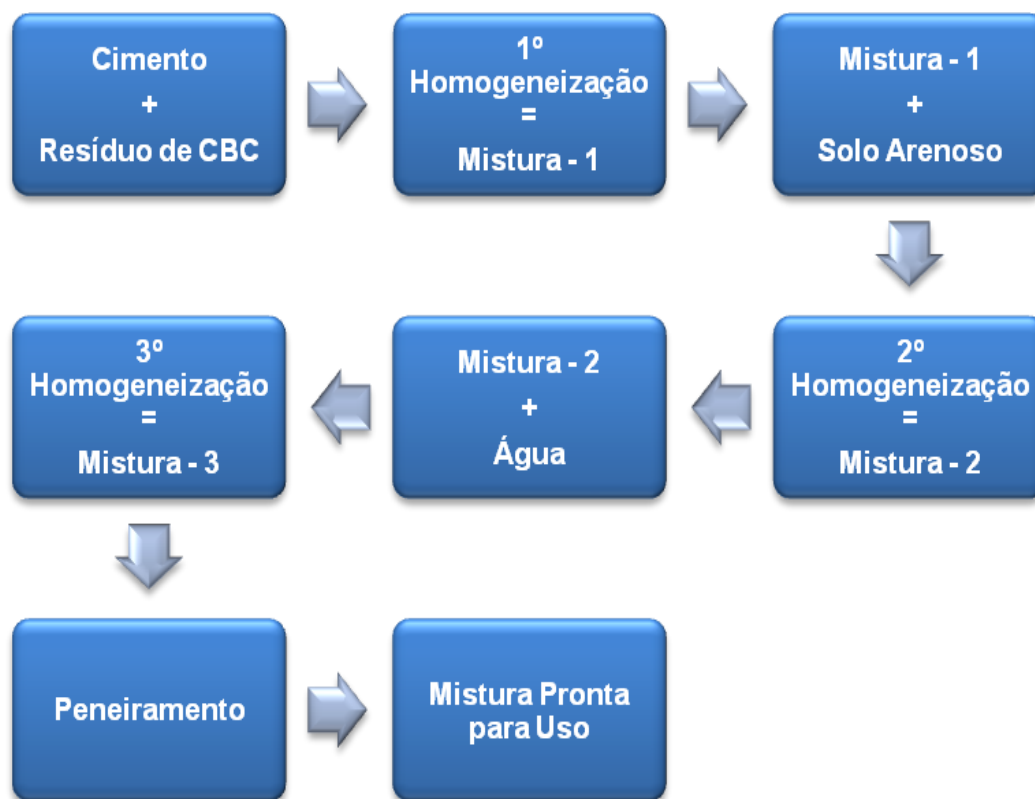


Figura 3.7. Fluxograma das etapas de produção da mistura para confecção dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC.

Inicialmente o resíduo de CBC foi colocado junto com o cimento, então foram misturados manualmente até que se obteve uma coloração homogênea, resultando na Mistura -1.

Em seguida a Mistura-1 foi adicionada ao solo arenoso, e foi realizada a 2ª homogeneização, também manual, resultando na Mistura - 2.

Logo após foi adicionada água a Mistura – 2, por meio de um borrifador de uso industrial, a fim de evitar a formação de grumos. Então foi realizada a 3ª homogeneização manual.

Para conferir que não houve a formação excessiva de grumos a Mistura – 3 foi passada pela a mesma peneira nº 4 ASTM que foi utilizada para conferir a granulometria adequada ao solo. Obtendo por fim a mistura que foi usada na fabricação dos corpos de prova cilíndricos.

3.3.1.2. Prensagem

Para a realização desta etapa o recipiente plástico contendo a mistura foi coberto com um pano úmido para prevenir a perda de umidade.

A prensagem da mistura foi realizada por uma prensa hidráulica, de fabricação da METALPEM, modelo PHP 15 t, utilizando-se uma pressão de 2 toneladas (Figura 3.8. a). Foram produzidos corpos de prova cilíndricos de 37 mm de diâmetro e 57 mm de altura.

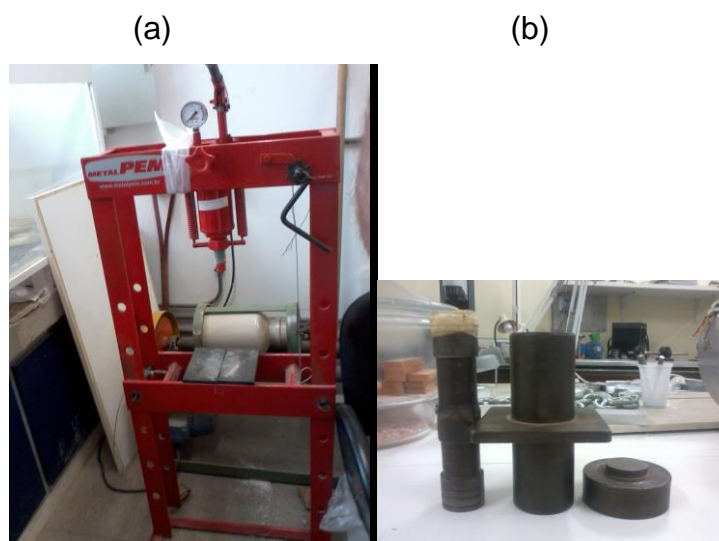


Figura 3.8. a) Prensa hidráulica METALPEM, modelo PHP 15 t; e b) molde cilíndrico de aço que foram utilizados na moldagem dos corpos de prova.

3.3.1.3. Cura

Como mencionado anteriormente, a cura é uma das etapas mais importantes da fabricação de tijolos solo-cimento. Ela proporciona condições favoráveis para a hidratação cimento, e conseqüentemente melhores propriedades.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram devidamente pesados, medidos, identificados, envolvidos por um filme plástico e dispostos em uma bancada plana, livre do sol, no laboratório de Processamento de Materiais II no LAMAV/CCT/UENF, onde permaneceram por 24 horas. Em seguida foram colocados na câmara úmida onde permaneceram até a idade dos ensaios.

3.4. Análise das propriedades das misturas preparadas

Neste trabalho foram estudadas as propriedades de resistência à compressão, absorção de água, massa específica aparente e variação dimensional dos corpos de prova fabricados.

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores de resistência à compressão e absorção de água, que de acordo com a NBR 10834 (2013) são critérios básicos de aceitação ou rejeição de tijolos solo-cimento.

Tabela 3.3. Valores exigidos de resistência à compressão e absorção de água para tijolos solo-cimento (NBR 10834, 2013).

Valores Limite (aos 28 dias de cura)	Média	Individual
Resistência à Compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de Água (%)	≤ 20	≤ 22

3.4.1. Ensaio de resistência à compressão simples

Os corpos de prova fabricados foram ensaiados de acordo com os procedimentos da norma NBR 12025 (1990) após 28 dias de cura, com o auxílio de uma máquina de ensaios universal (Figura 3.9), modelo 5582, de fabricação da Instron, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

Os ensaios de compressão simples foram realizados em 5 corpos de prova cilíndricos de cada traço estudado, totalizando 20 peças ensaiadas. A velocidade de aplicação da carga utilizada foi de 1 mm/min estabelecida pela NBR 12025 (1990).



Figura 3.9. Ensaio de resistência à compressão simples realizado em corpos de prova cilíndricos.

3.4.2. Ensaio de absorção de água

A determinação da absorção de água dos corpos de prova cilíndricos foi realizada seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 10836 (2013). Na realização deste ensaio foram utilizadas 5 peças de cada traço, com idade de 28 dias, uma balança digital BG-2000 Classe II (Figura 3.6), de fabricação da Gehaka, a estufa da Brasdonto (Figura 3.2), modelo 3, e um recipiente plástico, que foi utilizado como tanque de imersão.

3.4.3. Massa Específica Aparente

A massa específica aparente (D_a) dos corpos de prova cilíndricos foi determinada com o auxílio da seguinte equação:

$$D_a \text{ (g/cm}^3\text{)} = m/V = \{m/ [\pi (D/2)^2 H]\} \quad (3.3)$$

onde:

m = massa do corpo de prova (g);

V = é o volume do corpo de prova cilíndrico (cm^3);

D = diâmetro do corpo de prova (cm); e

H = altura do corpo de prova (cm).

As medidas de massa dos corpos de prova foram obtidas com o auxílio da balança digital BG-2000 Classe II (Figura 3.6), de fabricação da Gehaka I. O diâmetro e a altura dos corpos de prova foram medidos com o auxílio de um paquímetro digital Miltutoyo ($\pm 0,01$).

3.4.4. Variação dimensional

A variação dimensional, em relação ao volume (VV), altura (VL) e diâmetro (VD), dos corpos de prova das misturas estudadas foi determinada após 28 dias de cura de acordo com as seguintes expressões:

$$VV (\%) = // [(V_u - V_c) / V_u]100 // \quad (3.4)$$

V_u = é o volume do corpo de prova cilíndrico após moldagem (cm^3);

V_c = é o volume do corpo de prova cilíndrico após a cura (cm^3);

$$VL (\%) = // [(H_u - H_c) / H_u]100 // \quad (3.5)$$

H_u = é a altura do corpo de prova cilíndrico após moldagem (cm^3);

H_c = é a altura do corpo de prova cilíndrico após a cura (cm^3);

$$VD (\%) = // [(D_u - D_c) / H_u]100 // \quad (3.6)$$

D_u = é o diâmetro do corpo de prova cilíndrico após moldagem (cm^3);

D_c = é o diâmetro do corpo de prova cilíndrico após a cura (cm^3);

3.5. Análise microestrutural e de fases das misturas

3.5.1. Análise microestrutural

A análise da superfície de fratura e da microestrutura dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC, após 28 dias de cura, foi realizada através de microscopia Confocal, com auxílio do microscópio a laser de medição 3D, modelo LEXT OLS 4000, de fabricação Olympus.

3.5.2. Análise de fases

A análise de fases das misturas estudadas, após 28 dias de cura, foi realizada através de difração de raios-X (DRX), com o auxílio do difratômetro XRD-7000 de fabricação SHIMADZU. As fases cristalinas foram identificadas utilizando as fichas padrão JCPDS.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento experimental do presente projeto de fim de curso.

4.1. Caracterização das matérias-primas

4.1.1. Caracterização do solo

4.1.1.1. Caracterização química

A Tabela 4.1 mostra a composição química do solo usado neste trabalho. Pode ser observado que o solo é constituído basicamente de óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) com cerca de 75,33 %. Portanto se trata de um solo rico em quartzo. O solo contém também cerca de 7,40 % de óxido de ferro (Fe_2O_3), o qual confere cor avermelhada após queima. A perda ao fogo do solo é da ordem de 7,80 %, a qual deve estar relacionada à presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica.

Tabela 4.1. Composição química do solo usado.

Óxido	Teor (%)
SiO ₂	46,70
Al ₂ O ₃	28,63
Fe ₂ O ₃	7,40
K ₂ O	3,80
TiO ₂	2,21
SO ₃	2,00
CaO	0,98
ZrO ₂	0,24
V ₂ O ₅	0,13
MnO	0,07
ZnO	0,02
SrO	0,01
Y ₂ O ₃	0,01
PF (1000 °C)	7,80

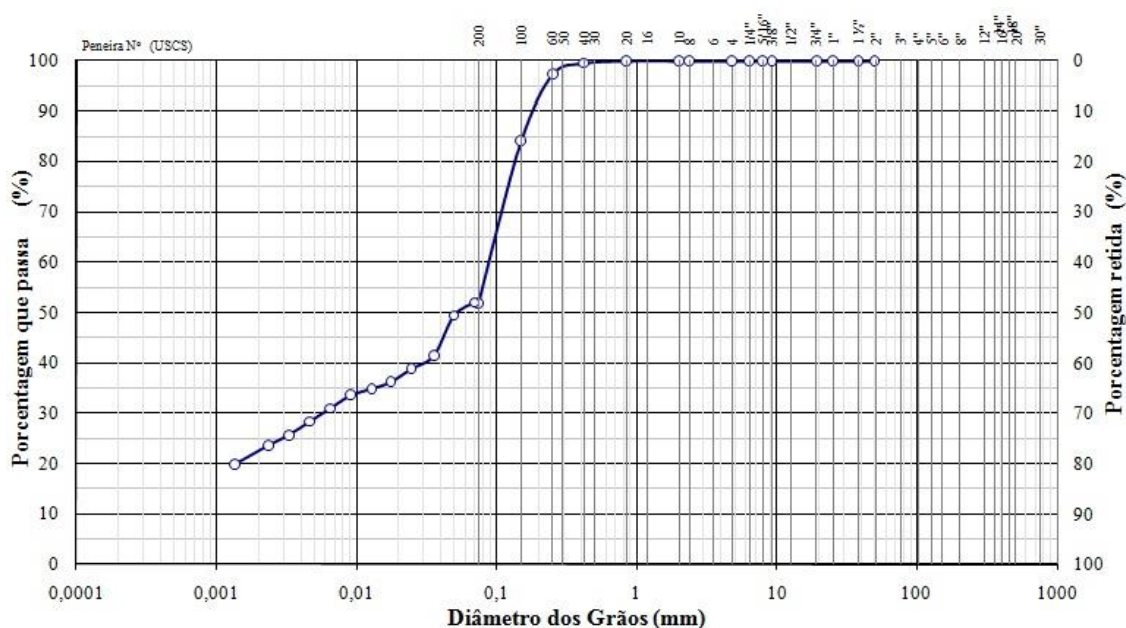
PF = perda ao fogo

4.1.1.2. Caracterização física

A Figura 4.1 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas do solo, obtida via análise combinada de sedimentação e peneiramento. Verifica-se que o solo utilizado possui cerca de 23 % da fração argila (< 2 µm), 29 % da fração silte (2 – 63 µm) e 48 % da fração areia (> 63 µm). Isto demonstra que o solo utilizado é rico em partículas de quartzo livre (areia), o que contribui com o aumento da resistência e diminuição da absorção de água, pois ele é inerte na reação de hidratação do cimento, atuando apenas como enchimento, liberando assim uma maior quantidade de cimento para aglomerar os grãos menores (Segantini, 2000).

Pode ser visto que a distribuição granulométrica do solo utilizada está bem próxima da recomendada pela ABCP (2002) para a fabricação de tijolos solo-cimento: fração argila entre 10 e 20 %; fração silte: 10 a 20 %; e fração areia: 50 e 70%. E também próxima da faixa determinada pelo CEPED (1999),

teor de areia variando entre 45 e 90%, teor de silte + argila entre 10 e 55%, teor de argila menor que 20%.



Com base na análise dos resultados da caracterização física pode ser afirmado que o solo utilizado trata-se de um solo arenoso adequado para a fabricação de tijolos solo-cimento.

4.1.1.3. Caracterização mineralógica

Na Figura 4.2 é apresentado o difratograma de raios-X para o solo utilizado neste trabalho. Pode ser observado que o solo apresenta picos característicos predominantes de caulinita, gibsita, illita/mica, quartzo, e goetita.

A caulinita é o argilomineral principal constituinte do solo e característico das argilas vermelhas da região de Campos dos Goytacazes (Vieira et al., 2001). Sendo também responsável pela plasticidade do solo quando misturado em água. A gibsita contribui com o aumento da perda de massa durante a queima e com a refratariedade da peça (Siqueira, 2013). Os picos de goetita revelam o alto teor de ferro presente no solo. Enquanto o quartzo é um mineral encontrado nas argilas e solos, contribui com a redução da plasticidade do material, sua elevada concentração no solo utilizada é uma característica atrativa para sua aplicação em tijolos solo-cimento. A illita/mica representam minerais ricos em óxidos fundentes, que são responsáveis por gerar a fase líquida na sinterização (Siqueira, 2013).

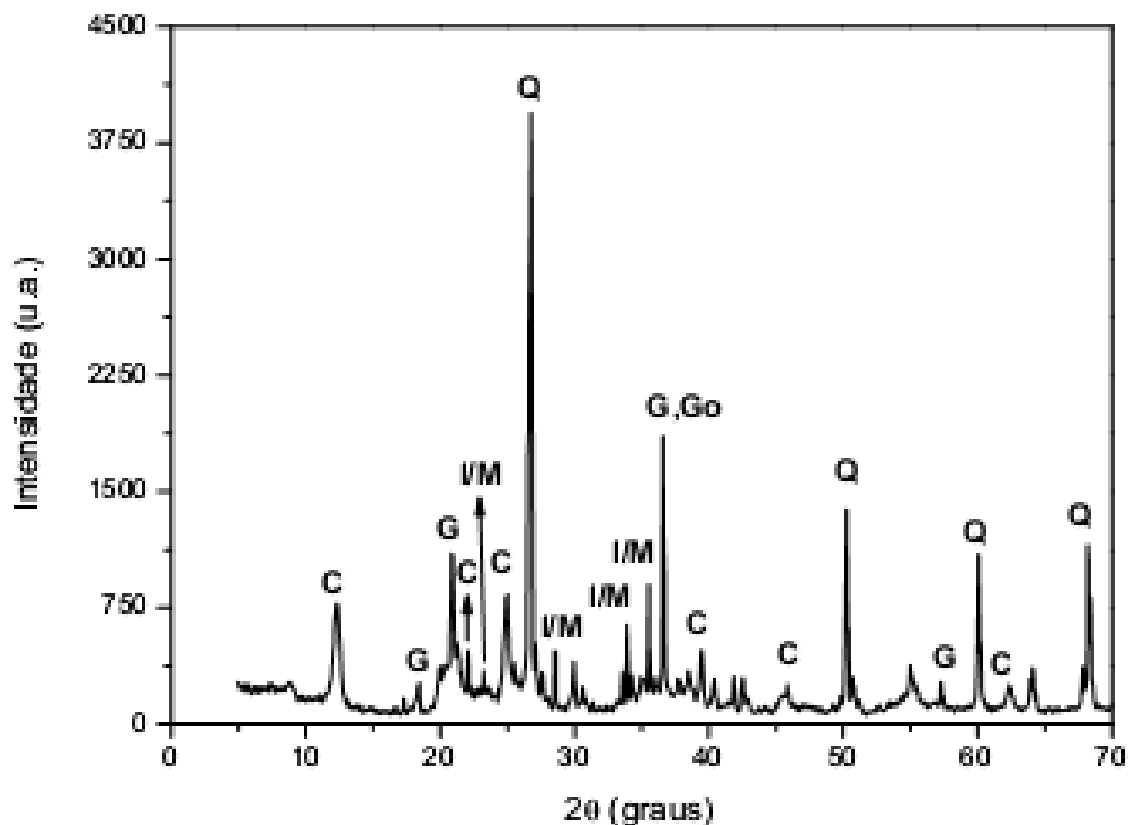


Figura 4.2. Difrátograma de raios-X do solo: C - Caulinita; G - Gibsitá; Go - Goetitá; I/M - Ilítá/Micá; Q - Quartzó.

Na Figura 4.3 é apresentada a curva de análise térmica diferencial (ATD) e a curva de análise termogravimétrica (ATG) do solo utilizado.

Os aspectos fundamentais são:

- Pequeno pico endotérmico na temperatura de cerca 52 °C devido à perda de água fisicamente adsorvida (livre), associada a uma perda de massa de aproximadamente 0,72 %.
- Pequeno pico endotérmico por volta de 270 °C revela a perda de água de hidratação de hidróxidos, como gibsitá e goetitá, associada a uma perda de massa associada de aproximadamente 1,76 % (Siqueira, 2013).
- Pequeno pico endotérmico em torno de 490 °C característico da desidroxilação da caulinita, que leva a formação da metacaulinita, associada a uma perda de massa de 4,97 % (Siqueira, 2013).

Pode ser notado ainda que nenhum outro evento térmico foi observado até temperatura de cerca de 1000°C.

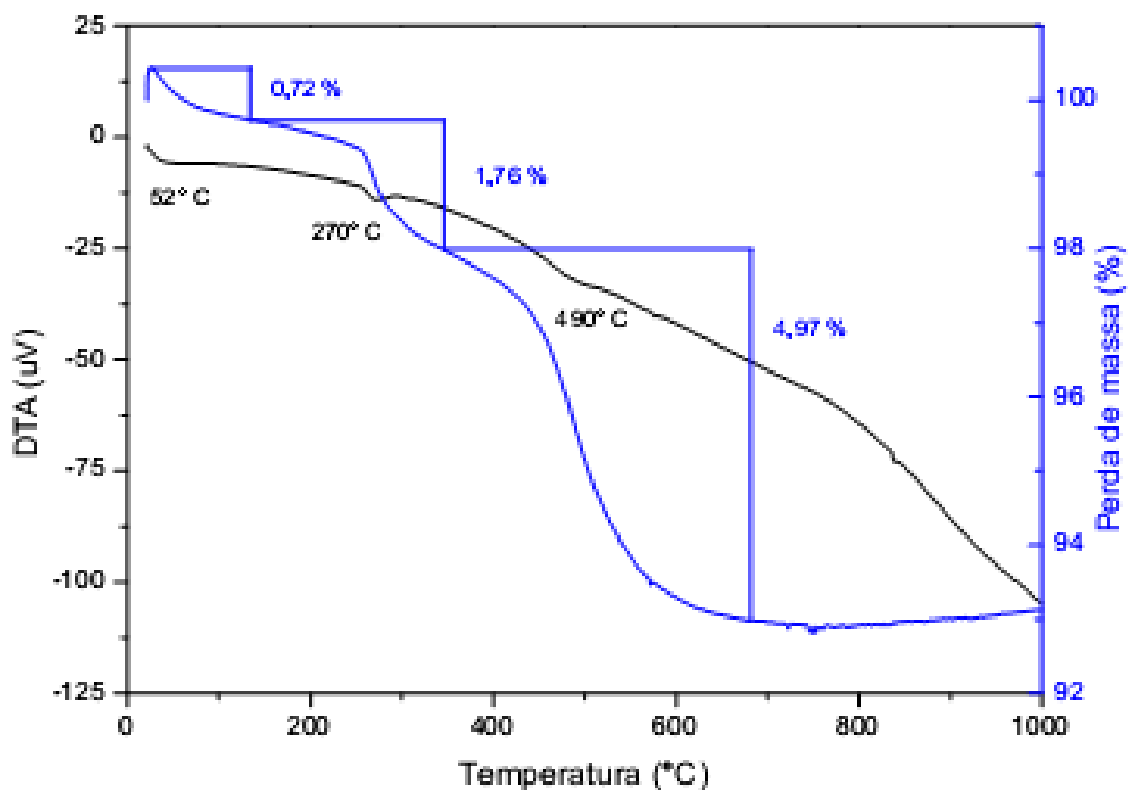


Figura 4.3. Curvas de análises térmicas diferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG) do solo utilizado.

4.1.2. Caracterização do cimento

4.1.2. Caracterização química

A Tabela 4.3 mostra a composição química do cimento utilizado neste trabalho. Pode ser visto que o cimento é constituído basicamente de óxido de cálcio (CaO) com 65,15 % em peso, seguido por pequenas quantidades de óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃). Como já foi dito anteriormente, o carbonato de cálcio (CaCO₃) é o principal constituinte do clínquer e os outros óxidos encontrados também fazem parte da composição química desta matéria-prima (Tabela 2.2).

Tabela 4.3. Composição química do cimento CP III-40RS utilizado.

Óxido	Teor (%)
SiO ₂	18,87
Al ₂ O ₃	7,11
Fe ₂ O ₃	1,21
K ₂ O	0,56
TiO ₂	0,53
SO ₃	3,71
CaO	65,15
MnO	0,30
SrO	0,06
PF (1000 °C)	7,80

PF = perda ao fogo

4.1.2.2. Caracterização mineralógica

A Figura 4.4 apresenta o difratograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS utilizado neste trabalho.

As fases identificadas foram: alita (silicato tricálcico - $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), belita (silicato dicálcio - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e gesso (sulfato de cálcio hidratado - $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Também foi identificada a presença de CaO, que deve estar relacionado ao calcário (CaCO_3) principal constituinte do clínquer e a escória de alto forno utilizada na fabricação do cimento. Estas fases identificadas são os principais componentes do cimento, conforme pode ser visto na Tabela 2.3, e são responsáveis pelo endurecimento da mistura (Neville, 1997).

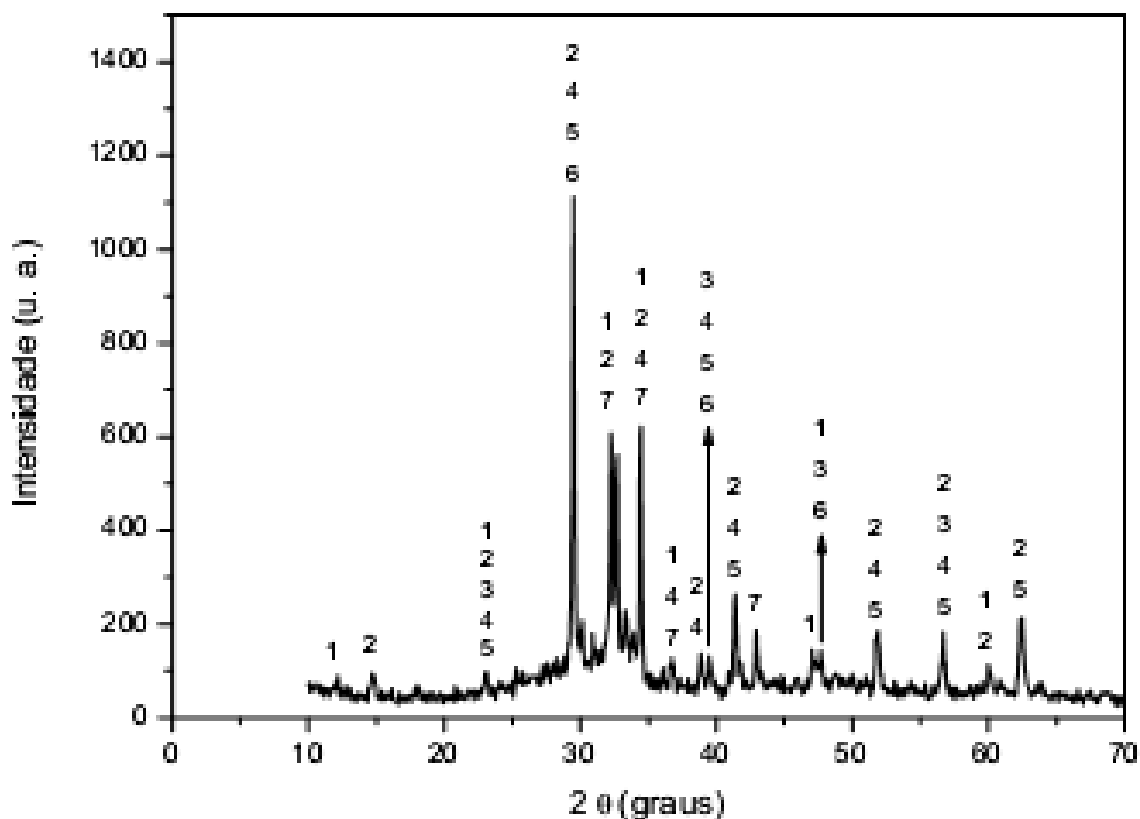


Figura 4.4. Difratoograma de raios-X do cimento Portland CEM III-40RS utilizado no trabalho: 1 - Ferroaluminato tetracálcio (C_4AF); 2 – Alita (C_3S); 3 - Carbonato de cálcio; 4 - Belita (C_2S); 5 - Aluminatotricálcio (C_3A); 6 - Óxido de cálcio; 7 - Gipsita ($CaSO_4$).

4.1.3. Caracterização do resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC)

4.1.3.1. Caracterização química

Na Tabela 4.4 é apresentada a composição química e perda ao fogo do resíduo de CBC. Pode ser visto que ele é constituído principalmente por SiO_2 (49,19%), seguido por quantidades significativas de CaO , K_2O , Fe_2O_3 e Al_2O_3 . Porém a quantidade de sílica encontrada, no resíduo utilizado, está abaixo da faixa encontrada na literatura, que é acima de 60% em peso de sílica. Isto pode ser resultado do tipo de solo da região de cultivo da cana de açúcar (Cordeiro, 2009). E a soma dos percentuais de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão abaixo do valor mínimo de 70% exigido pela NBR 12653 (2012) – Materiais pozolânicos.

Ainda, a perda ao fogo do resíduo foi relativamente alta, da ordem de 9,17% em peso. Este valor está próximo ao valor máximo de 10,0% permitido pela NBR 12653 (2012). Esta perda ao fogo pode estar relacionada à presença de matéria orgânica na amostra de resíduo de CBC estudado, que é de 10,32%.

Tabela 4.4. Composição química do resíduo de CBC.

Óxidos	Resíduo de CBC utilizado (%)	Teixeiras et. al. (2008) (%)	Borlini et. al (2006) (%)	Freitas (2005) (%)
SiO ₂	49,19	85,58	77,5	83,1 / 65,7
Al ₂ O ₃	7,97	5,25	4,70	5,1 / 13,8
Fe ₂ O ₃	8,73	1,31	3,80	2,6 / 4,1
SO ₃	1,73	-	-	-
TiO ₂	0,95	0,32	0,30	-
P ₂ O ₅	1,03	0,54	2,30	-
CaO	10,02	2,08	2,30	1,9 / 3,5
MnO	0,20	0,08	0,30	-
K ₂ O	9,47	3,46	5,40	4,5 / 8,1
ZrO ₂	0,09	-	-	-
V ₂ O ₅	0,05	-	-	-
ZnO	0,09	-	-	-
SrO	0,02	-	-	-
P.F.(1000 °C)	9,17	-	-	-

PF = perda ao fogo

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores de umidade higroscópica e teor de matéria orgânica do resíduo de CBC utilizado neste trabalho. O resíduo apresenta considerável quantidade de matéria orgânica. Além disso, apresenta alta umidade higroscópica podendo ser um indicativo de que este resíduo pode atrapalhar o processo de hidratação do cimento e conseqüentemente prejudicar as propriedades da mistura. E também este teor de umidade está acima do máximo de 3,0% estabelecido pela NBR 12653 (1992).

Tabela 4.5. Características relevantes do resíduo de CBC.

Característica	Valor (%)
Umidade higroscópica	8,70
Teor de Matéria Orgânica	10,32

4.1.3.2. Caracterização física

A análise granulométrica do resíduo de CBC é mostrada na Figura 4.5. O resíduo apresenta larga distribuição de tamanho de partícula, onde o diâmetro esférico equivalente varia entre 1,6 e 900 μm . Pode ser visto que a quantidade de fração argila ($< 2 \mu\text{m}$) obtida é muito baixa da ordem de 0,7 %, seguido de 11,5 % de silte ($2 \leq x < 63 \mu\text{m}$) e fração areia ($> 63 \mu\text{m}$) da ordem de 87,8 %. Isto mostra que o material de resíduo apresenta um alto percentual de partículas grosseiras, o que indica as presenças de quartzo e cristobalita. Pode ser verificado que o tamanho médio das partículas do resíduo é da ordem de 180 μm .

O valor da massa específica real dos grãos obtido foi de 2,39 g/cm^3 , o qual reflete a sua composição mineralógica.

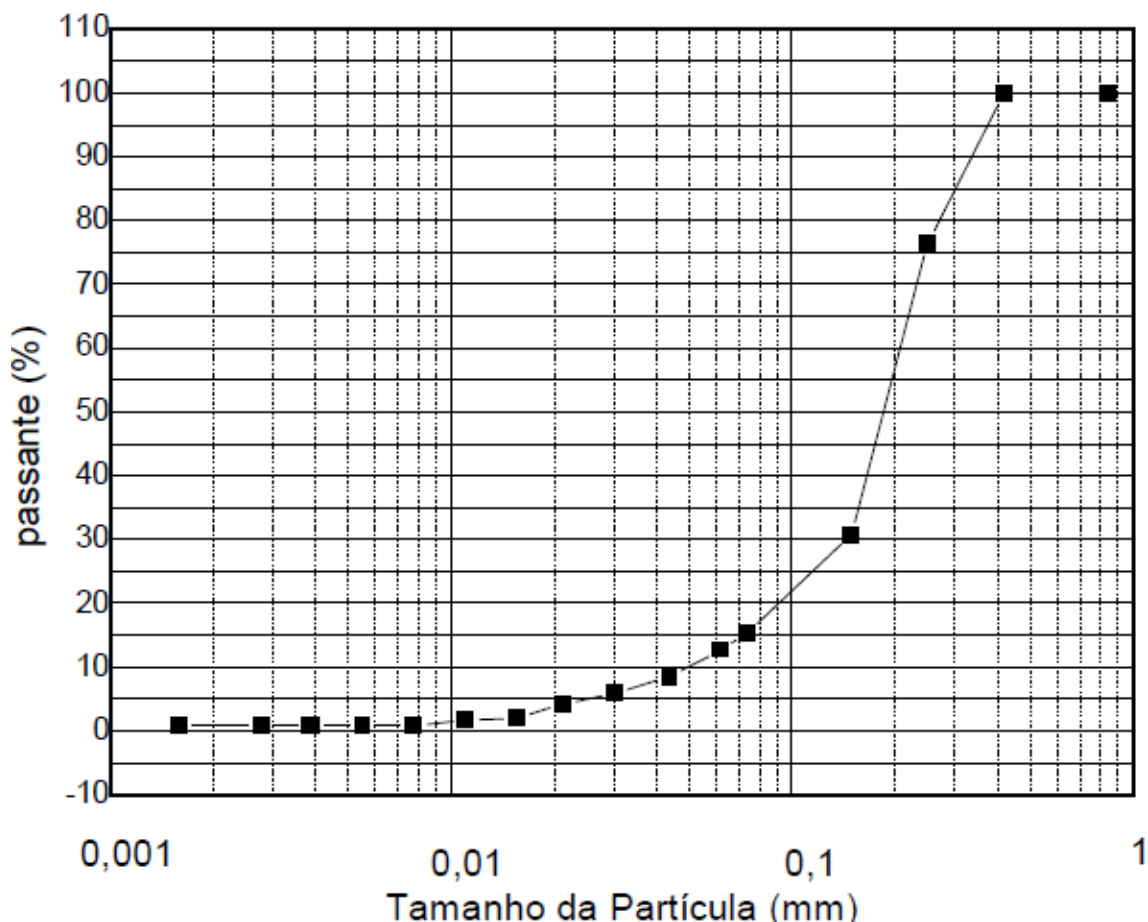


Figura 4.5. Distribuição de tamanho de partícula do resíduo de CBC.

A Figura 4.6 apresenta diversas micrografias do resíduo de CBC in natura obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Na Figura 4.6 (a) são vistas partículas angulares, provavelmente de cristobalita e/ou quartzo e, também, longas placas de bagaço não queimado. A Figura 4.6 (b) e (c), mostra partículas com aspecto poroso e tubular. Essas partículas porosas podem ser resultado da combustão de matéria orgânica durante a queima do bagaço. Na Figura 4.6 (d) é observada uma partícula de aspecto angular, possivelmente de quartzo. Este tipo de morfologia em resíduo de CBC tem sido observado na literatura. É notada também a larga distribuição de tamanho de partículas, que corroboram os dados granulométricos do resíduo (Figura 4.5).

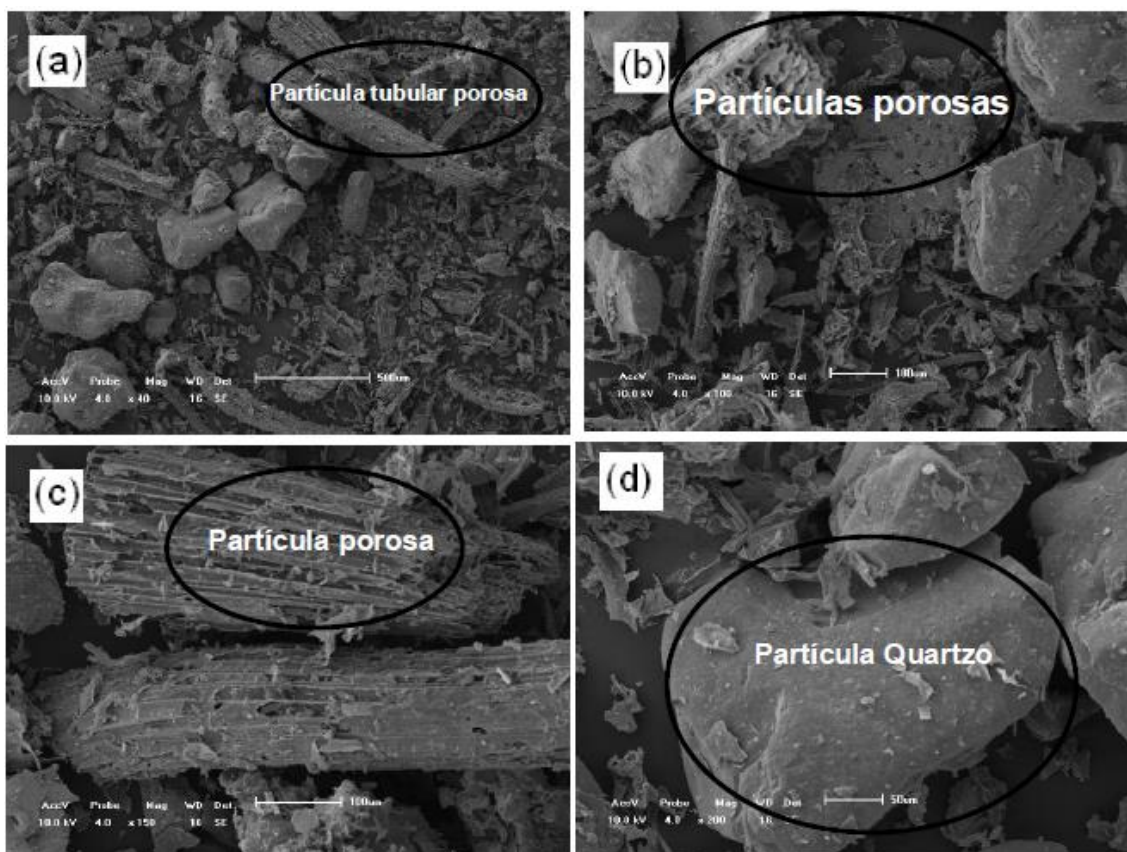


Figura 4.6. Morfologia das partículas do pó do resíduo de CBC: a) 40X; b) 100X; c) 150X; e d) 200X.

Na Figura 4.7 é apresentado o espectro de EDS (espectrometria de energia dispersiva de raios-X) da amostra do resíduo de CBC. Os seguintes elementos foram identificados na amostra: C, O, Fe, Mg, Al, Si, K e Nb. Estes resultados estão em acordo com as análises química e mineralógica do resíduo de CBC. Porém a presença do Nb não é comum neste tipo de resíduo e pode estar relacionado com a composição da caldeira da usina.

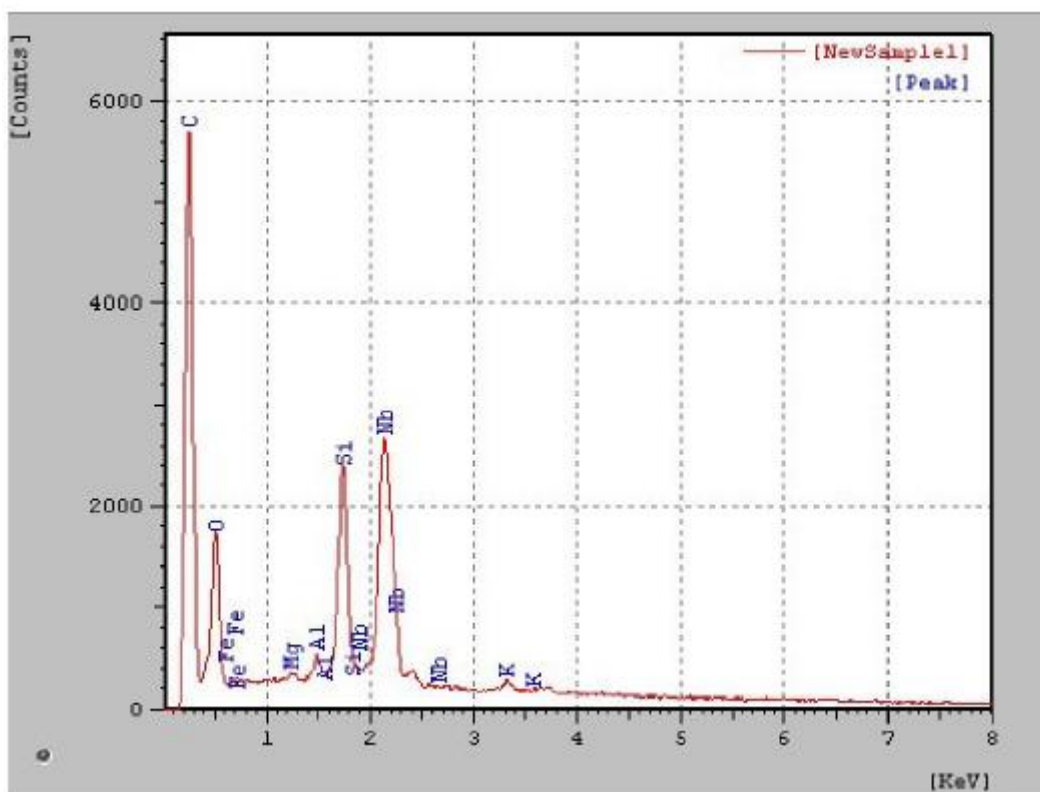


Figura 4.7. Espectro de EDS para a amostra de resíduo de CBC.

4.1.2.3. Caracterização mineralógica

A Figura 4.8 apresenta o difratograma de raios-X do resíduo de CBC in natura utilizado nesse trabalho. As seguintes fases cristalinas foram identificadas na amostra do resíduo: quartzo (SiO_2), cristobalita (SiO_2), mulita primária ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), carbonato de potássio (K_2CO_3), fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) e hematita (Fe_2O_3). Essa elevada quantidade de quartzo encontrada reduz a reatividade da pozolana por ser uma fase inerte. Para melhorar as propriedades pozolânicas seria necessário a transformação da sílica cristalina em sílica amorfa, que é mais reativa (Freitas, 2005). A presença de sílica em estado cristalino está relacionada com o tipo de solo e com a contaminação do resíduo por partículas de areia. Já o carbonato de potássio é um composto encontrado em cinzas vegetais (Vita *et al* , 2007). Pode ser destacado que a mineralogia do resíduo está de acordo com a composição química (Tabela 4.2).

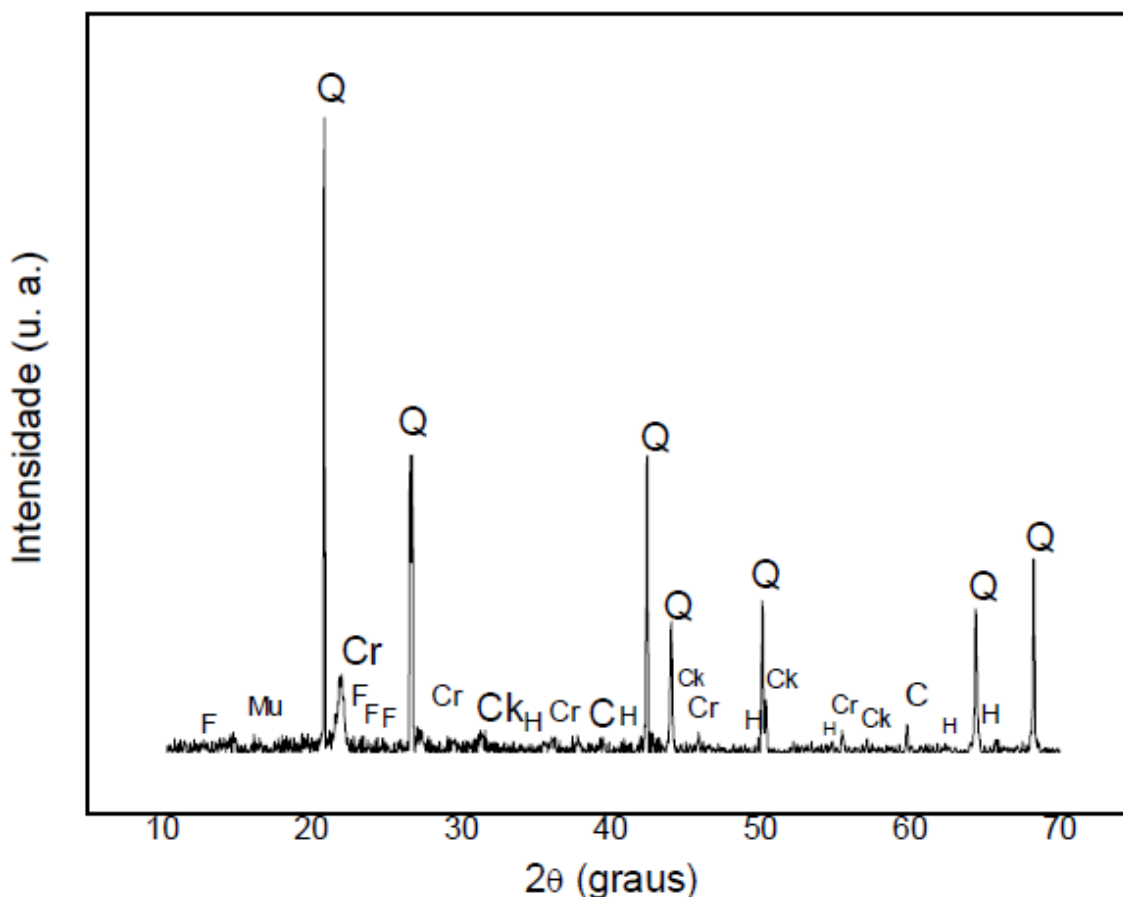


Figura 4.8. Difratograma de raios-X para a amostra de resíduo de CBC: Cr – cristobalita; Ck – carbonato de potássio; F- fosfato de cálcio; H – hematita; Q – quartzo; Mu – mulita primária.

Na Figura 4.9 é apresentada a curva de análise térmica diferencial (ATD) e na Figura 4.10 a curva de análise termogravimétrica (ATG) e derivativa termogravimétrica (DTG) do resíduo de CBC. A curva de ATG indica que ocorreu uma grande perda de massa durante o aquecimento, através de decomposição e vaporização do material.

Os aspectos fundamentais são:

- Pequeno pico endotérmico na temperatura de cerca 45 °C devido à perda de água fisicamente adsorvida (livre), associada a uma perda de massa de aproximadamente 2,4%.
- Pequeno pico exotérmico por volta de 350 °C. revela a presença de carbonato de potássio, presente na amostra do resíduo (Freitas, 2005), que começa a se dissociar nessa temperatura até a fusão acima de 800°C.

- Pico exotérmico intenso em torno de 525 °C, é característico da combustão do carbono. E também, pode estar relacionado com a transformação polimórfica a 573 °C do quartzo α para quartzo β , o qual se mantém estável até a temperatura de 870°C (Ernst, 1971). O que confirma a predominância de sílica livre (SiO_2) no resíduo de CBC. Pode ser observada na Figura 4.10 uma perda de massa de aproximadamente 43,3% devida, principalmente, a combustão da matéria orgânica.

Pode ser notado ainda que nenhum outro evento térmico foi observado até temperatura de cerca de 1150°C.

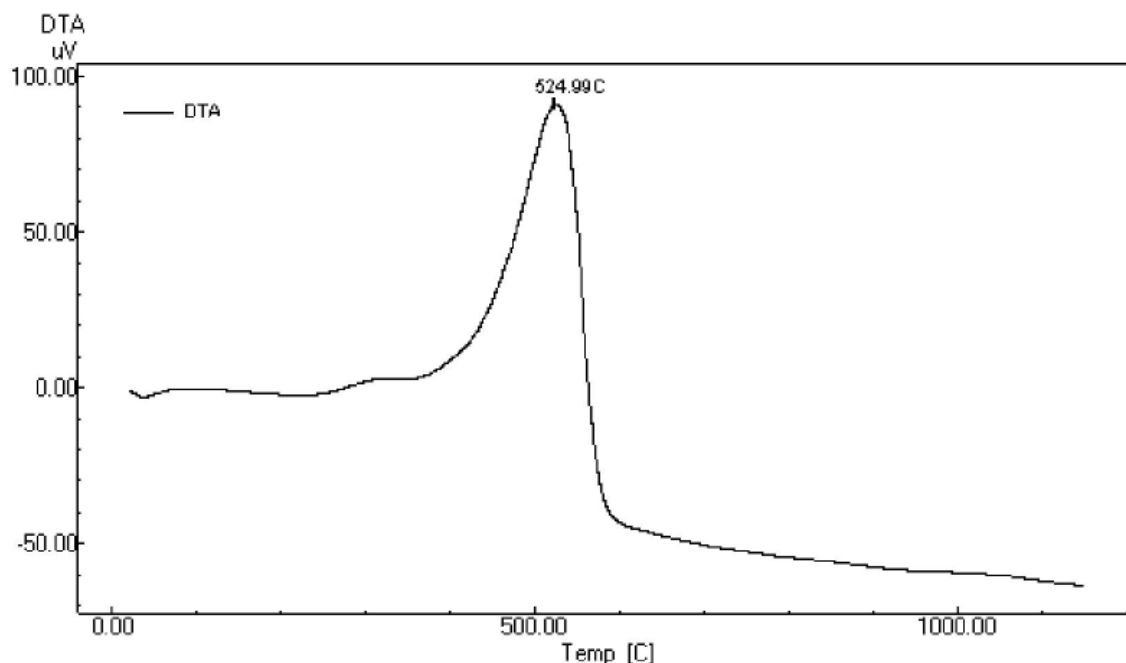


Figura 4.9. Curva de análise térmica diferencial (ATD) da amostra de resíduo de CBC.

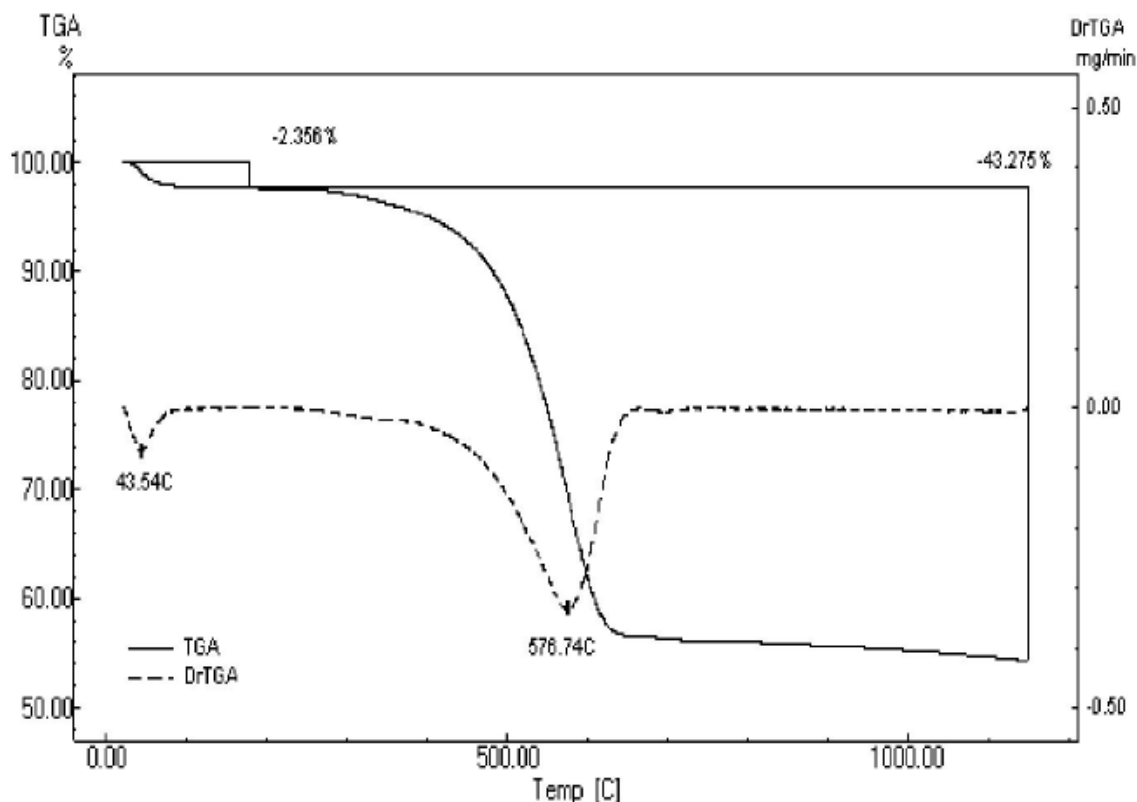


Figura 4.10. Curvas de análises termogravimétricas (ATG e DTG) da amostra de resíduo de CBC.

4.1.2.4. Determinação da atividade pozolânica

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores da condutividade elétrica e o índice de atividade pozolânica obtidos utilizando o método de Luxan et al. (1989). Pode ser visto que o índice obtido classifica o resíduo como possuindo atividade pozolânica moderada. Mas o valor obtido de $0,44 \mu\text{S}/\text{cm}$ está bem próximo do limite inferior da faixa para materiais com atividade moderada ($0,4 \mu\text{S}/\text{cm}$). Segundo Rodrigues (2004), o método de Luxan et al. (1989) não garante que o decréscimo da condutividade elétrica reflète o grau de atividade pozolânica do material ensaiado. Pois pode ocorrer nucleação com os íons Ca^{+2} , que são atraídos para a superfície das partículas sem que ocorra a reação entre íons e sílica amorfa; ainda mais neste curto período de tempo. Sendo assim esta diminuição da condutividade estaria mais associada à superfície das partículas do que com o teor e a qualidade de sua fase ativa.

Tabela 4.6. Valores da condutividade elétrica e índice de atividade pozolânica obtidos utilizando o método de Luxan et al. (1989).

Antes da adição do resíduo de CBC ($\mu\text{S/cm}$)	Após a adição do resíduo de CBC ($\mu\text{S/cm}$)	Índice de atividade pozolânica ($\mu\text{S/cm}$)
18,26	17,82	0,44

4.2. Análise das propriedades das misturas preparadas

4.2.1. Resistência à compressão

Na Figura 4.11 é apresentado o comportamento da resistência à compressão em função do teor de resíduo de CBC incorporado para os corpos de provas ensaiados após os 28 dias de cura. Este é o tempo de cura recomendado para ensaio dos corpos de prova visando o seu emprego em tijolos solo-cimento, pois nesta idade o cimento praticamente completa a sua hidratação e atinge a resistência máxima. Nesta figura é apresentado o valor mínimo médio de resistência à compressão ($\geq 2,0$ MPa) de acordo com a norma NBR 10834 (2013).

Pode ser visto que quanto maior a adição de resíduo CBC em substituição ao cimento Portland a resistência mecânica diminui. Isto ocorre porque há redução da quantidade de cimento no traço, e o cimento é que promove o aumento de resistência da mistura. Por outro lado, os resultados da Figura 4.11 também mostram que todos os corpos de prova apresentaram valor de resistência à compressão média acima do estabelecido pela norma NBR 10834 (2013), independentemente do traço utilizado.

Na Tabela 4.7 são mostrados os valores médios, de cada traço estudado, obtidos no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias de cura.

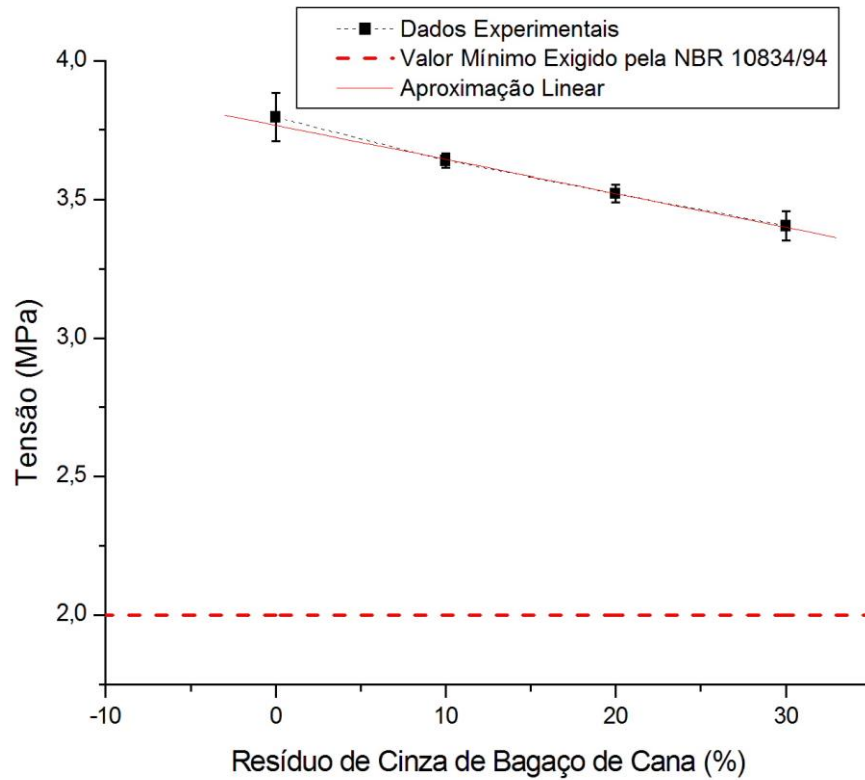


Figura 4.11. Resistência à compressão média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.

Tabela 4.7. Resistência à compressão média dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC após 28 dias de cura.

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
A ₀	3,80 ± 0,08	13,16
A ₁₀	3,64 ± 0,03	4,37
A ₂₀	3,56 ± 0,03	5,36
A ₃₀	3,55 ± 0,06	7,71

Na Figura 4.12 é apresentado os menores valores individuais de resistência à compressão obtidos em função do teor de resíduo de CBC para os corpos de provas ensaiados após os 28 dias de cura. Nesta figura é apresentado o valor mínimo de resistência à compressão individual ($\geq 1,7$ MPa) de acordo com a norma NBR 10834 (2013).

Na Figura 4.12 pode ser visto que nenhum dos corpos de prova incorporados com resíduo aos 28 dias de cura apresentou resistência à compressão individual inferior a 1,7 MPa, que é o valor mínimo exigido pela NBR 10834 (2013). Isto significa que, em termos de resistência mecânica, todos os traços estudados podem ser usados na fabricação de tijolos solo-cimento.

Para melhor compreensão, os menores valores de resistência mecânica dos corpos de prova individual são dados na Tabela 4.8.

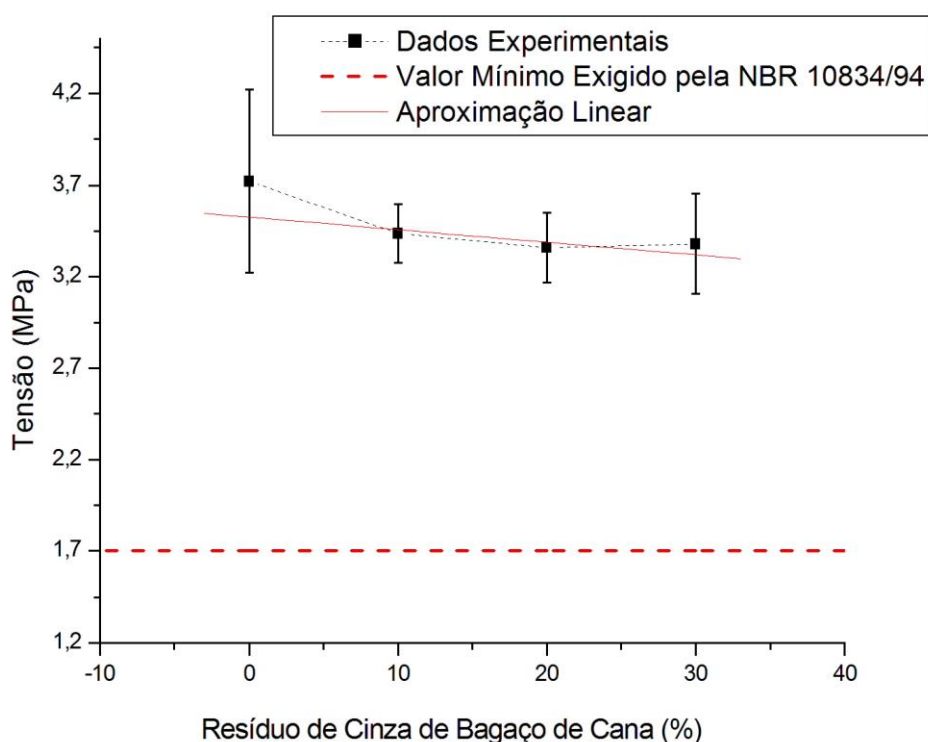


Figura 4.12. Menores valores de resistência à compressão individual versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.

Tabela 4.8. Menores valores individuais obtidos no ensaio de compressão dos corpos de prova aos 28 dias de cura.

Traço	Resistência à compressão (MPa)
A ₀	3,7 ± 0,5
A ₁₀	3,4 ± 0,2
A ₂₀	3,4 ± 0,2
A ₃₀	3,4 ± 0,3

4.2.2. Absorção de água

Na Figura 4.13 é apresentado o comportamento da absorção de água (porosidade aberta) em função do teor de resíduo incorporado para os corpos de provas ensaiados após os 28 dias de cura. Nesta figura é também apresentado o valor máximo médio permitido de absorção de água ($\leq 20\%$) de acordo com a norma NBR 10834 (2013). Para melhor compreensão, os valores médios de absorção de água dos corpos de prova estão apresentados na Tabela 4.9.

Na Figura 4.13 pode ser observado que todos os traços estudados após 28 dias de cura apresentaram valores de absorção de água médios dentro do estabelecido pela NBR 10834 (2013). Pode ser notado que com o aumento da adição de resíduo de CBC ocorreu uma diminuição no valor de absorção de água. Este comportamento é melhor visualizado no ajuste linear dos dados experimentais traçado nesta figura.

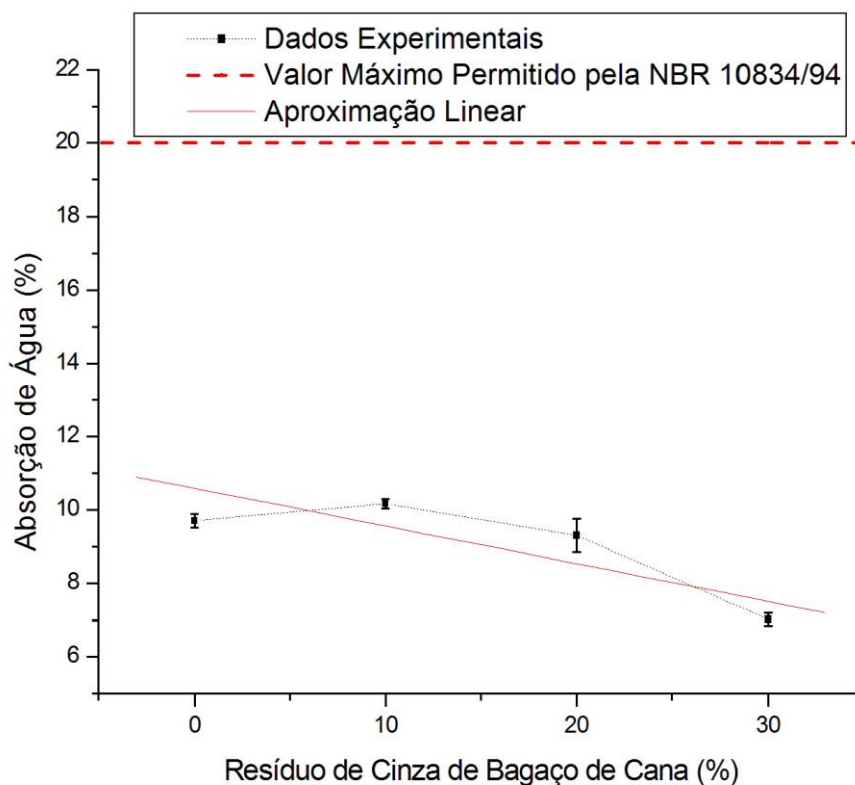


Figura 4.13. Absorção de água média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores médios de absorção de água das misturas estudadas aos 28 dias de cura.

Tabela 4.9. Absorção de água média dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC após 28 dias de cura.

Traço	Absorção de água (%)	Coefficiente de variação (%)
A ₀	9,7 ± 0,2	9,69
A ₁₀	10,2 ± 0,1	5,12
A ₂₀	9,3 ± 0,3	19,86
A ₃₀	7,0 ± 0,2	13,10

Na Figura 4.14 é apresentado um gráfico com os maiores valores individuais de absorção de água obtidos em função do teor de resíduo de CBC para os corpos de provas ensaiados após os 28 dias de cura. Nesta figura é apresentado o valor máximo de absorção de água individual ($\leq 22\%$) de acordo com a norma NBR 10834 (2013).

Na Figura 4.14 pode ser observado que todos os traços estudados após 28 dias de cura apresentaram valores de absorção de água individual inferior a 22%, que é o valor máximo permitido pela NBR 10834 (2013). Então se pode afirmar que em termos de absorção de água também, todos os traços estudados podem ser usados para a confecção de tijolos solo-cimento.

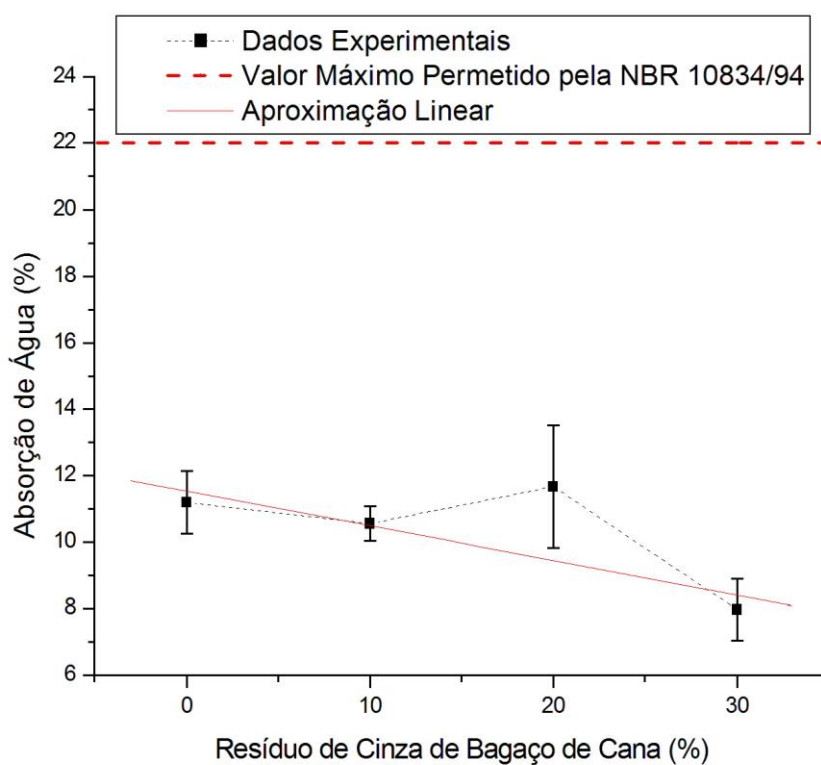


Figura 4.14. Maiores valores de absorção de água individual obtidos no ensaio versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.

Na Tabela 4.10 são mostrados os maiores valores individuais obtidos no ensaio de absorção de água dos corpos de prova incorporados com resíduo aos 28 dias de cura.

Tabela 4.10. Maiores valores individuais obtidos no ensaio de absorção de água dos corpos de prova incorporados com resíduo após 28 dias de cura.

Traço	Absorção de água (%)
A ₀	11,2 ± 0,9
A ₁₀	10,6 ± 0,5
A ₂₀	12 ± 2
A ₃₀	8,0 ± 0,9

4.2.3. Massa específica aparente

Na Figura 4.15 é apresentado o comportamento da massa específica aparente média em função do teor de resíduo de CBC incorporado para as misturas estudadas, antes da etapa de cura e após os 28 dias de cura. Pode ser visto em ambas as curvas que a incorporação de resíduo de CBC na mistura praticamente não influenciou a densidade.

Comparando as duas curvas, pode ser observado que a densidade dos corpos de prova é um pouco maior logo após a moldagem. Pois durante a etapa de cura as misturas perdem um pouco de água.

Pode ser visto também que os corpos de prova incorporados com 10 % de resíduo de CBC apresentaram um comportamento diferente dos demais traços. O que pode ser consequência da fabricação e preparação das misturas, visto que é um processo manual e mais passível de erros. Porém este desvio ainda é muito pequeno na ordem de 0,01 g/cm³.

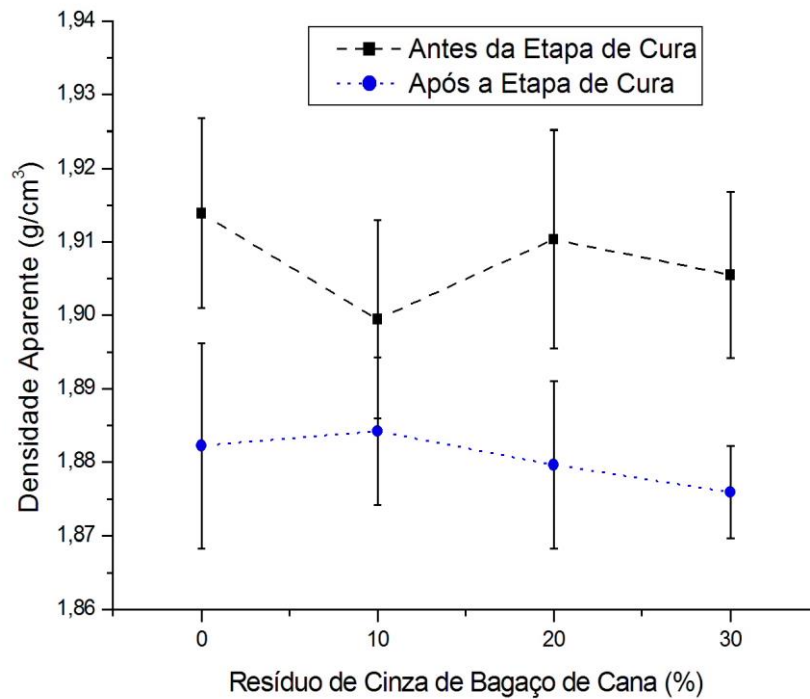


Figura 4.15. Massa específica aparente versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos antes da cura e após 28 dias de cura.

Para melhor compreensão dos resultados na Tabela 4.11 estão apresentados os valores médios de massa específica aparente dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC antes e após os 28 dias de cura.

Tabela 4.11. Valores médios de massa específica aparente dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC antes e após os 28 dias de cura.

Traço	Densidade Aparente (g/cm ³)			
	Antes da Cura	CV ¹ (%)	Após a Cura	CV ¹ (%)
A ₀	1,91 ± 0,01	0,68	1,88 ± 0,01	0,74
A ₁₀	1,90 ± 0,01	0,71	1,88 ± 0,01	0,53
A ₂₀	1,91 ± 0,01	0,78	1,88 ± 0,01	0,60
A ₃₀	1,91 ± 0,01	0,59	1,88 ± 0,01	0,33

1 – Coeficiente de variação.

4.2.4. Variação dimensional

Na Figura 4.16 é apresentado o comportamento da variação volumétrica média em função do teor de resíduo de CBC incorporado para as misturas estudadas.

Pode ser visto que a incorporação de resíduo de CBC na mistura de modo geral diminuiu a variação volumétrica, este comportamento fica mais evidente quando é analisada a aproximação linear. Porém, a mistura com incorporação de resíduo de 10% CBC apresentou maior variação em comparação com as outras, o que está associado com a menor densificação desta mistura, como pode ser visto na Figura 4.15 na curva antes da cura.

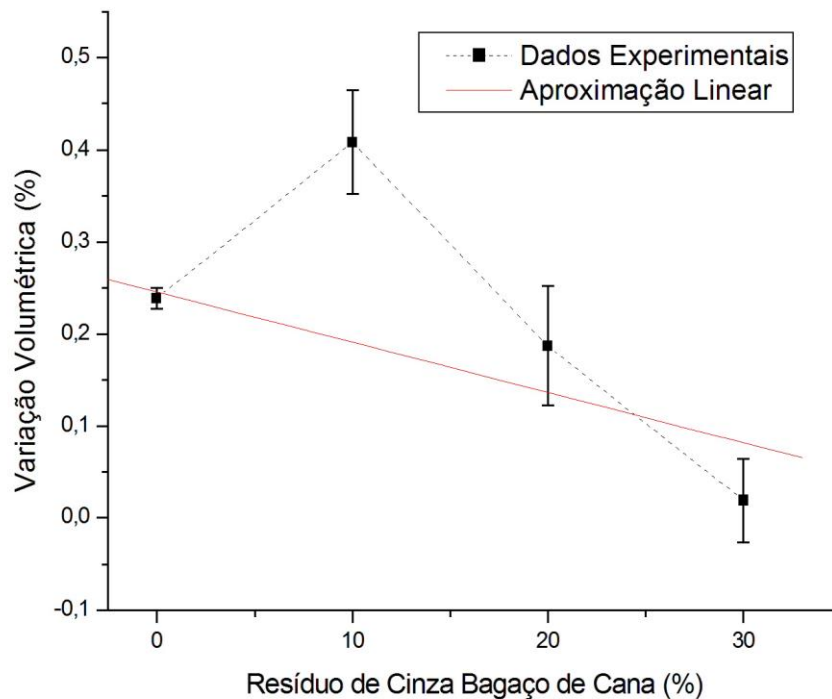


Figura 4.16. Variação volumétrica versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos.

Na Figura 4.17 é apresentado o comportamento da variação linear de altura média em função do teor de resíduo de CBC incorporado para as misturas estudadas.

Pode ser visto que a incorporação de resíduo de CBC na mistura de modo geral aumentou a variação linear em relação ao traço padrão. Porém quando é feita uma comparação somente entre as misturas incorporadas é observado que com o aumento da incorporação de resíduo a variação linear praticamente não se altera.

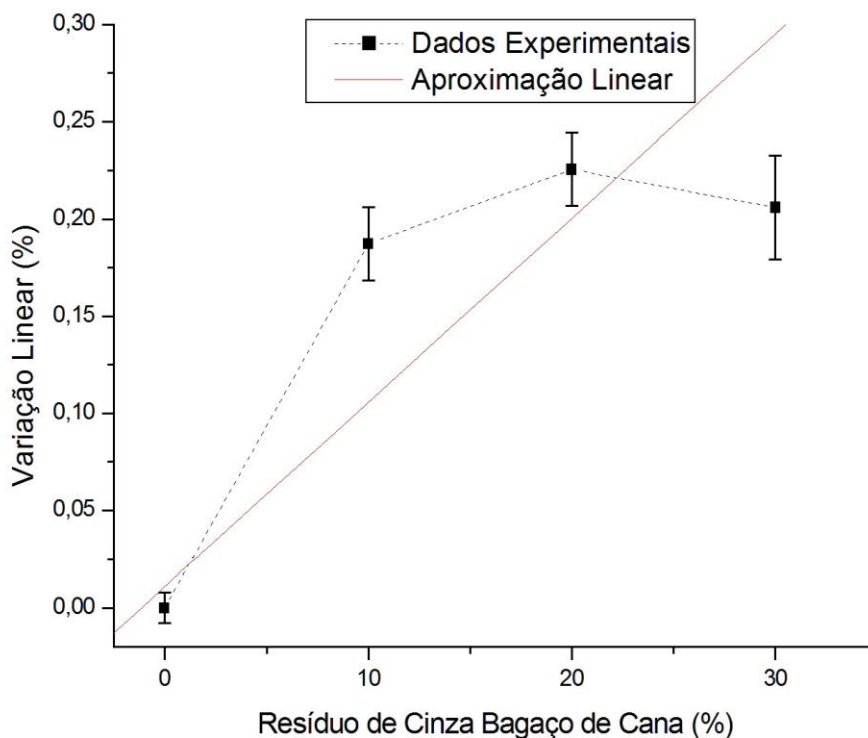


Figura 4.17. Variação linear de altura média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos.

Na Figura 4.18 é apresentado o comportamento da variação diametral de média em função do teor de resíduo de CBC incorporado para as misturas estudadas.

Pode ser observado que a incorporação de resíduo de CBC na mistura de modo geral não alterou a variação diametral dos corpos de prova, isto pode ser melhor visualizado na aproximação linear da curva. Este comportamento é resultado do processo de fabricação dos corpos de prova, pois a matriz utilizada possui diâmetro fixo e ainda este não depende da carga aplicada. Porém o traço incorporado com 20% de resíduo apresentou um comportamento um pouco diferente em relação aos outros.

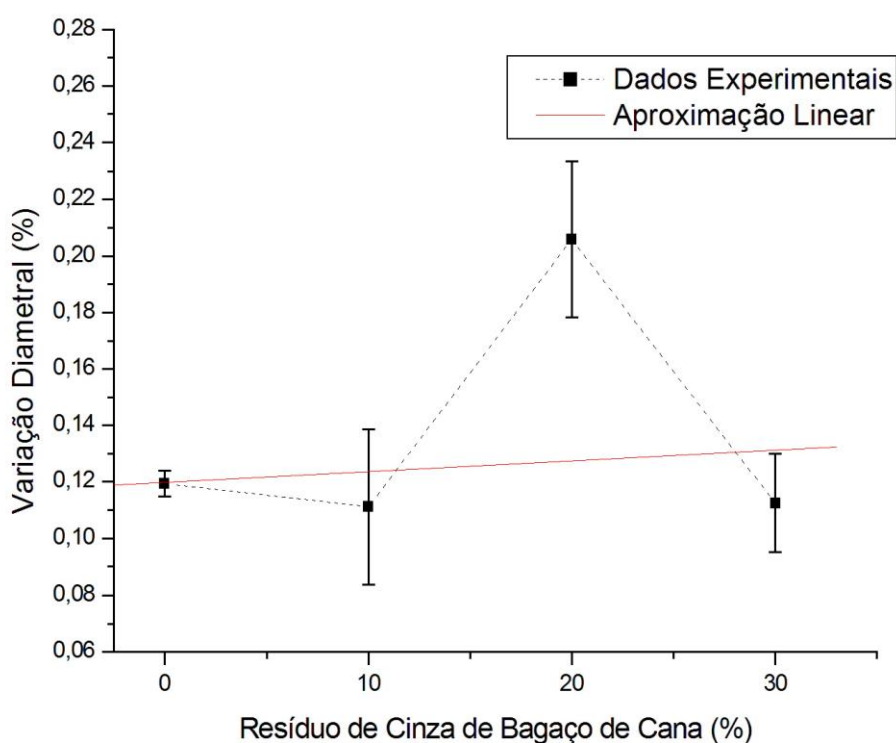


Figura 4.18. Variação diametral média versus porcentagem de resíduo de CBC incorporada dos corpos de prova cilíndricos.

Para melhor compreensão dos resultados na Tabela 4.12 são apresentados os valores médios da variação dimensional dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC. Onde o sinal de negativo indica expansão.

Pode ser observado que as misturas apresentam um comportamento anisotrópico. E que a variação linear dos traços se trata, na verdade, de retração linear.

Quando é feita uma comparação entre as variações dimensionais dos traços estudados pode ser afirmado que a maior variação encontrada se trata de retração volumétrica do traço incorporado com 10% de resíduo. E a menor se trata de retração linear de altura de aproximadamente 0,00% para o traço padrão. Também pode ser verificado que a variação dimensional mais uniforme é da mistura com 20% de resíduo. Por fim pode ser observado que as variações dimensionais são bem pequenas.

Tabela 4.12. Valores médios da variação dimensional dos corpos de prova incorporados com resíduo de CBC antes e após os 28 dias de cura.

Traço	Variação Volumétrica (%)	Variação Linear (%)	Variação Diametral (%)
A ₀	-0,24 ± 0,01	0,00 ± 0,01	-0,12 ± 0,01
A ₁₀	0,41 ± 0,06	0,19 ± 0,02	0,11 ± 0,03
A ₂₀	-0,19 ± 0,06	0,23 ± 0,02	-0,21 ± 0,03
A ₃₀	-0,02 ± 0,064	0,21 ± 0,03	-0,11 ± 0,02

4.3. Análise microestrutural e de fases das misturas preparadas

4.3.1. Análise microestrutural

A Figura 4.19 apresenta as micrografias obtidas por microscopia confocal, em três aumentos diferentes da superfície de fratura, para os corpos de prova referência, ou seja, sem incorporação de resíduo após 28 dias de cura.

Pode ser observado que o traço de referência apresenta grande quantidade de partículas de quartzo. Isso está relacionado com o alto teor de partículas de areia (SiO₂) encontrado no solo arenoso (Tabela 4.1). De uma forma geral, a microestrutura apresenta uma coloração uniforme, indicando que houve uma boa homogeneização da mistura o que reflete na boa resistência mecânica deste traço. Pode ser verificado também que existe uma grande presença de poros na mistura, refletindo na absorção de água.

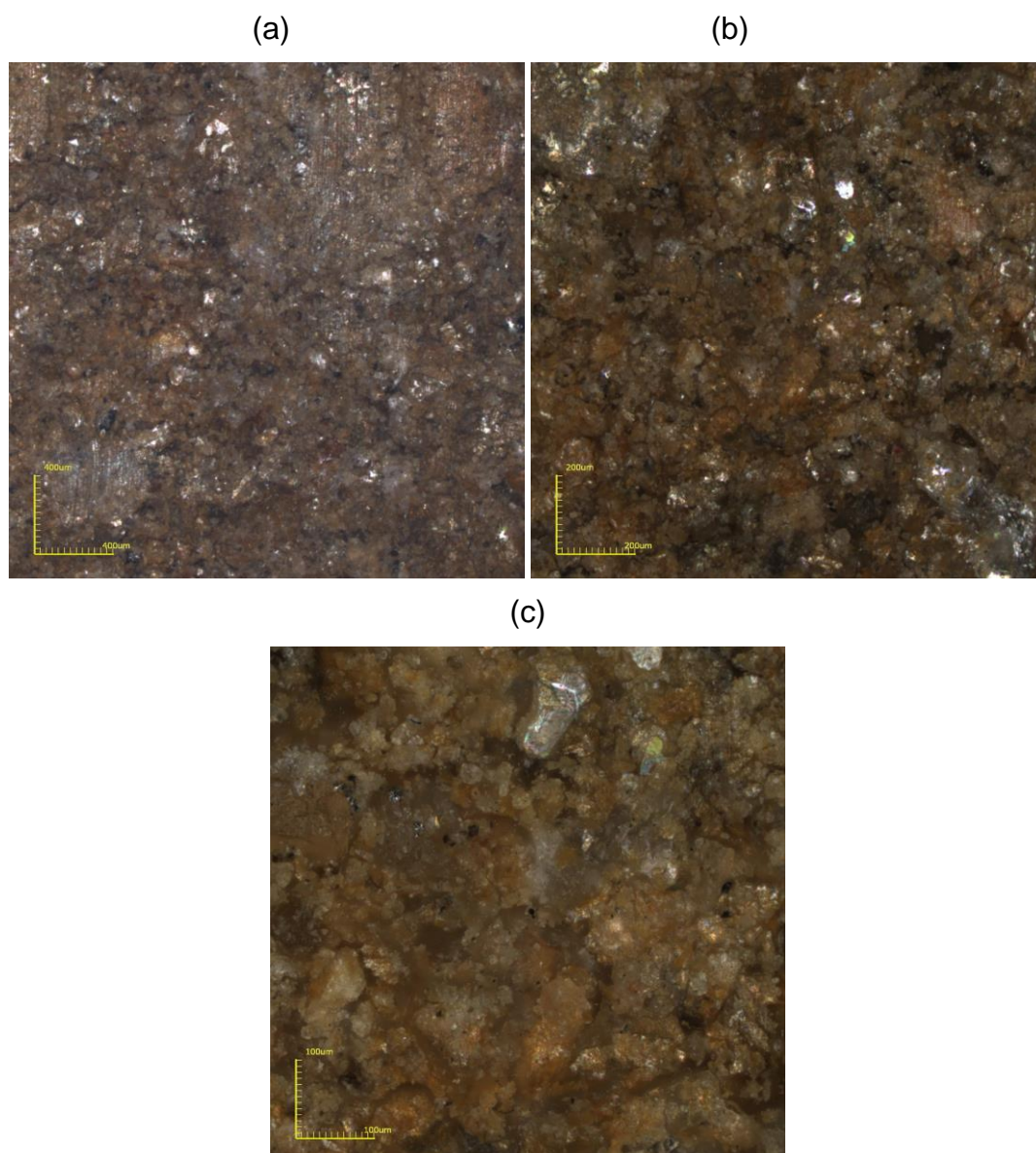


Figura 4.19. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 0% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.

A Figura 4.20 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal do corpo de prova com incorporação de 10% de resíduo de CBC após 28 dias de cura.

Pode ser observado que a massa cimentícia incorporada com 10% de resíduo de CBC apresenta aglomerados do resíduo na região próximo às pastas de cimento. Isto pode estar relacionado com o processo de fabricação dos corpos de prova, pois foi realizada primeira a homogeneização do cimento com o resíduo. Pode ser verificado também que a quantidade de poros na

mistura diminuiu. E ainda que a coloração não é uniforme o que pode ser proveniente uma homogeneização não eficiente da massa.

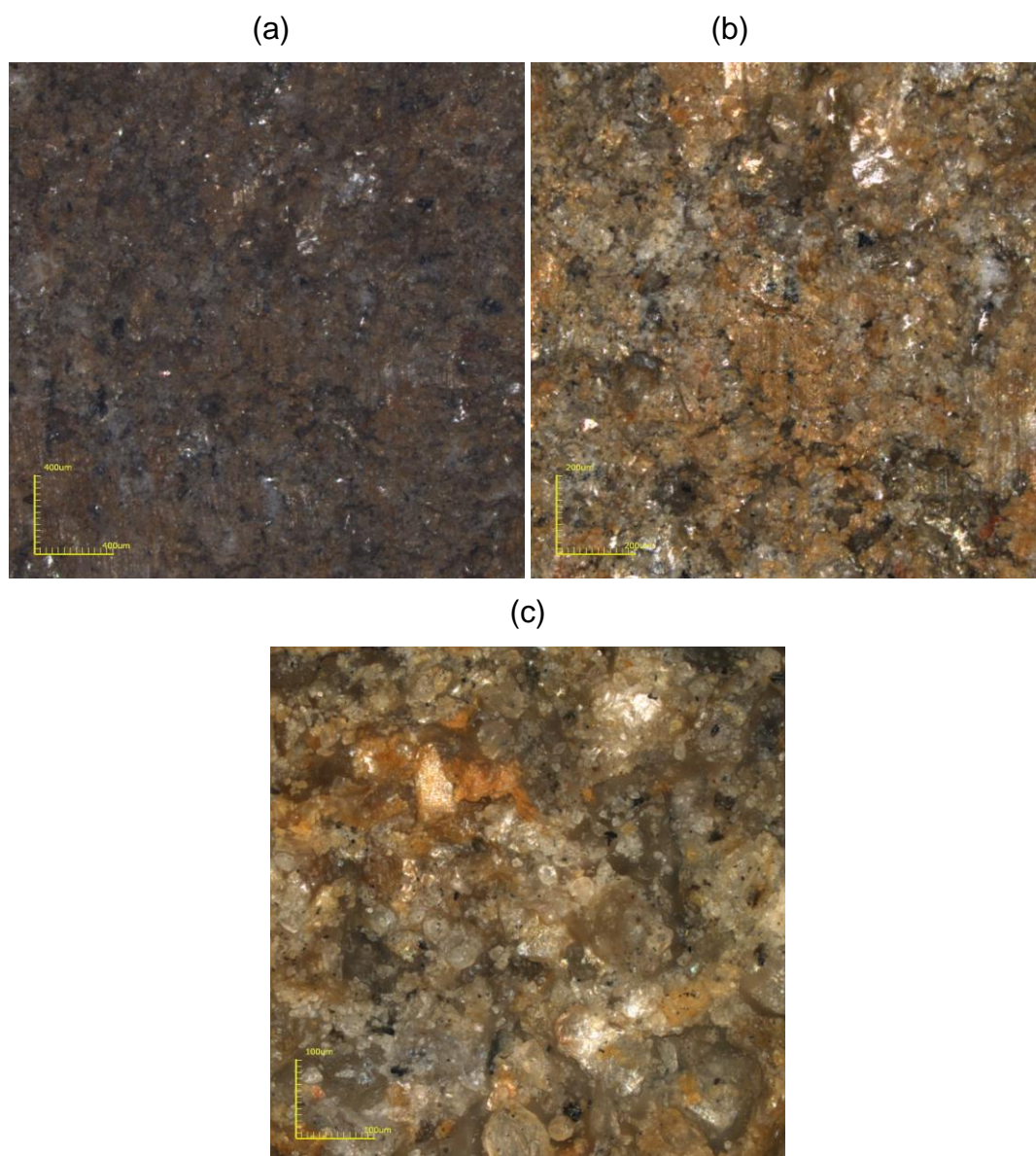


Figura 4.20. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 10% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.

A Figura 4.21 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal do corpo de prova com incorporação de 20% de resíduo de CBC após 28 dias de cura.

O resíduo aparece em meio a pasta de cimento, o que pode estar relacionado a alta umidade higroscópica do resíduo CBC, que resultou numa

menor resistência da mistura. Isto é um indicativo de que o resíduo de CBC pode prejudicar o processo de hidratação do cimento.

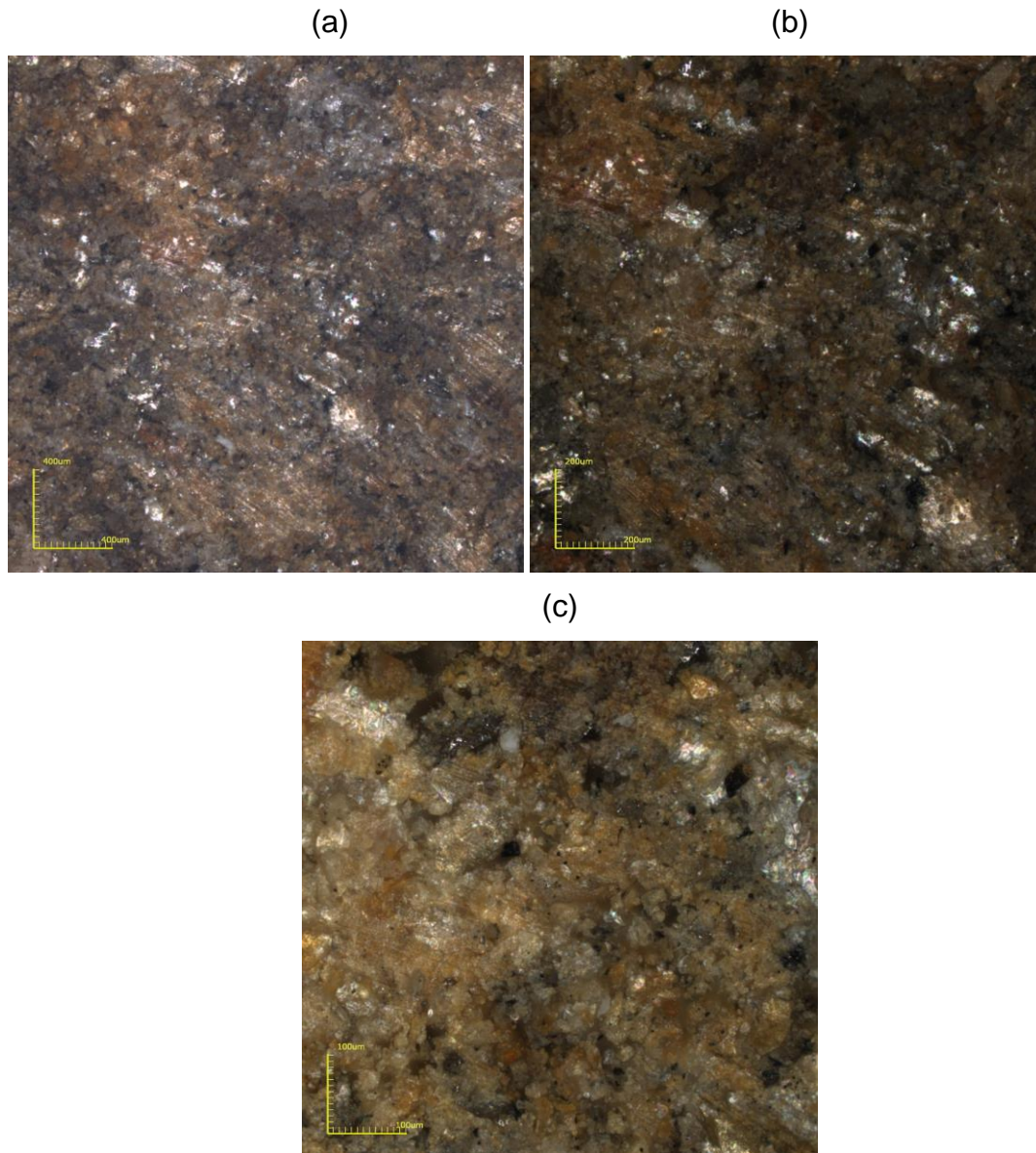


Figura 4.21. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 20% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.

A Figura 4.22 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal do corpo de prova com incorporação de 30 % de resíduo de CBC após 28 dias de cura.

Pode ser observado que a massa cimentícia incorporada com 30% de resíduo de CBC apresenta uma coloração mais uniforme que as outras

misturas, indicando que a homogeneização foi mais eficiente. O resíduo encontra-se disperso na mistura, não apresentando aglomerados. Pode ser verificado também que a quantidade de poros na mistura diminuiu, refletindo na absorção de água.

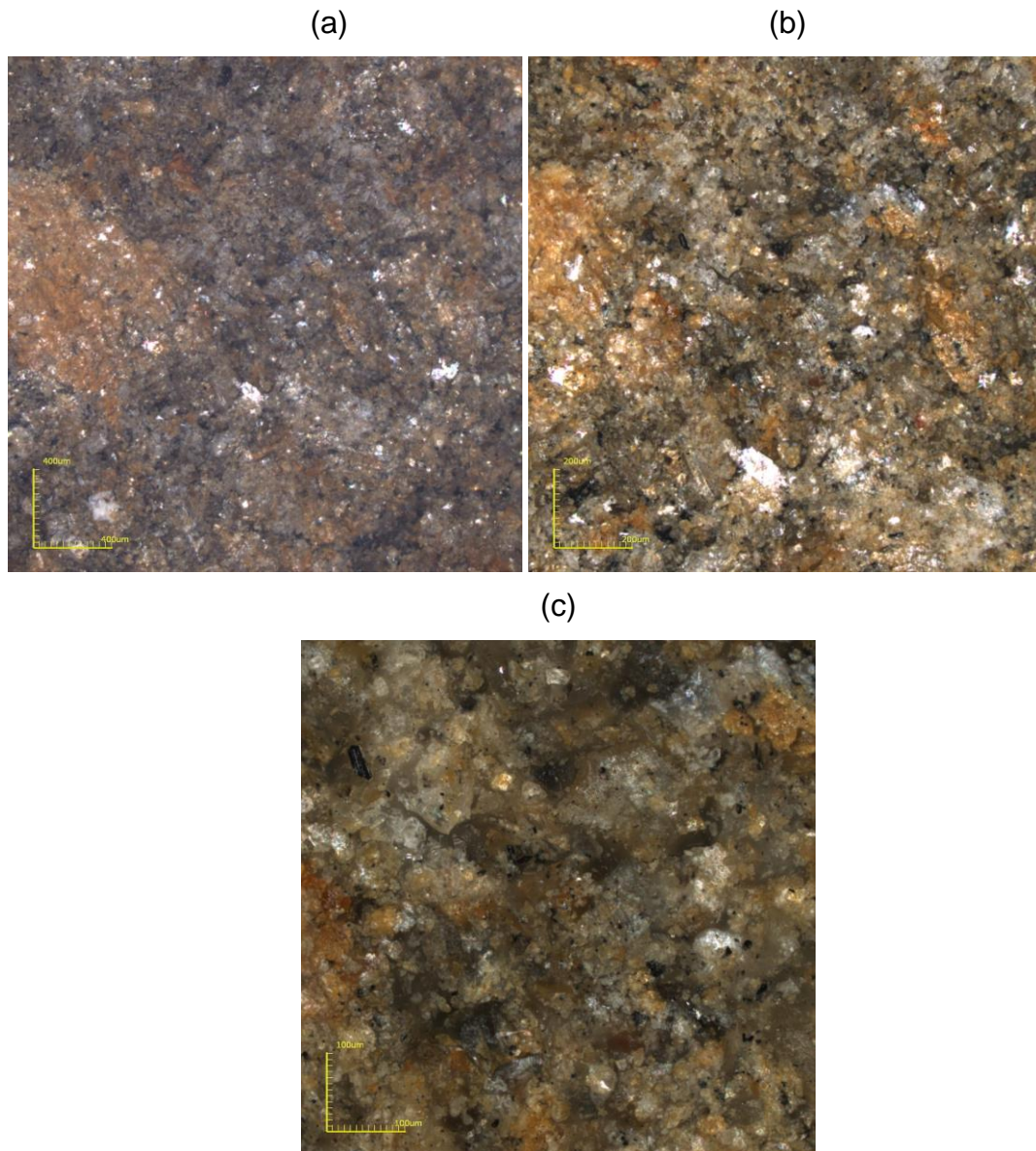


Figura 22. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 30% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x; (c) 430x.

Na Figura 4.23 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal dos quatro traços estudados.

Pode ser notado que com o aumento da porcentagem do resíduo de CBC, não foi observado aglomerados do resíduo. O que contribuiu para redução da porosidade aberta da mistura. Pode ser afirmado também que a resistência mecânica sofre uma diminuição devido à redução da quantidade de cimento na mistura.

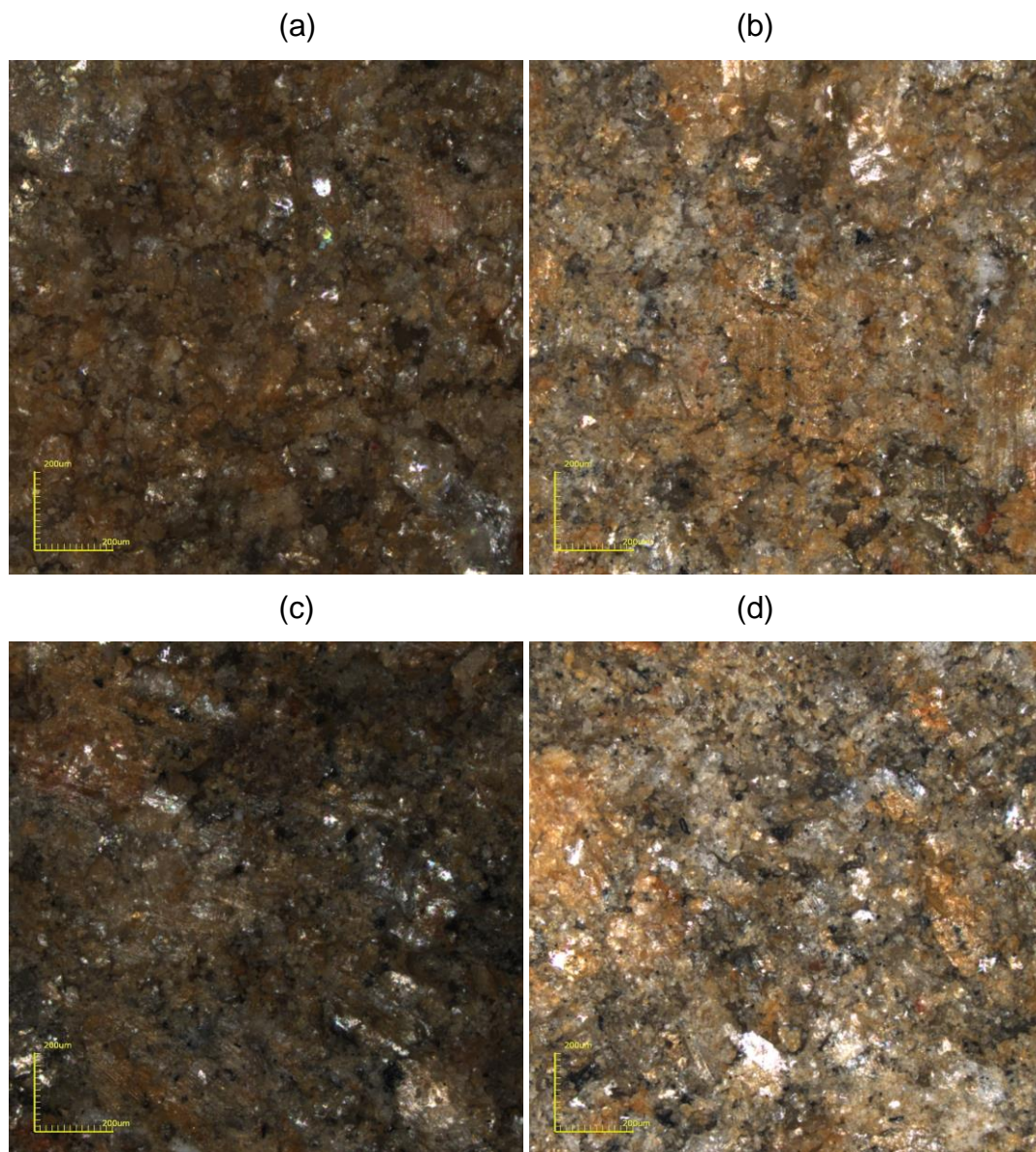


Figura 4.23. Microestrutura da superfície de fratura das misturas estudadas com aumento de 216x após 28 dias de cura: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30% de resíduo de CBC.

4.3.2. Análise de fases

A Figura 4.24 apresenta os difratogramas de raios-X das misturas com incorporação de 0, 10, 20 e 30% de resíduo de CBC, após 28 dias de cura.

A adição de 20% e 30% de resíduo de CBC modificou a fase cristalina ilita/mica. Enquanto a fase gibsita já foi modificada com adições de 10% de resíduo, onde o segundo pico deu lugar ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto da reação de hidratação do cimento. E as fases quartzo e caulinita não foram influenciadas pela adição de resíduo de CBC. Foi notada a formação de novas fases como etringita, portlandita (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essas fases são decorrentes da hidratação das fases anidras do cimento durante o processo de cura (Siqueira, 2013). E ainda a presença de fases como Alita (C_3S), aluminato tricálcio (C_3A) e ferroaluminato tetracálcio (C_3AF) que são componentes do cimento e não sofreram hidratação. Ainda, quando comparado os difratogramas de raios-X de 10, 20 e 30% de incorporação de CBC, com o difratograma de 0% houve o aparecimento do pico de mulita característico do resíduo de CBC.

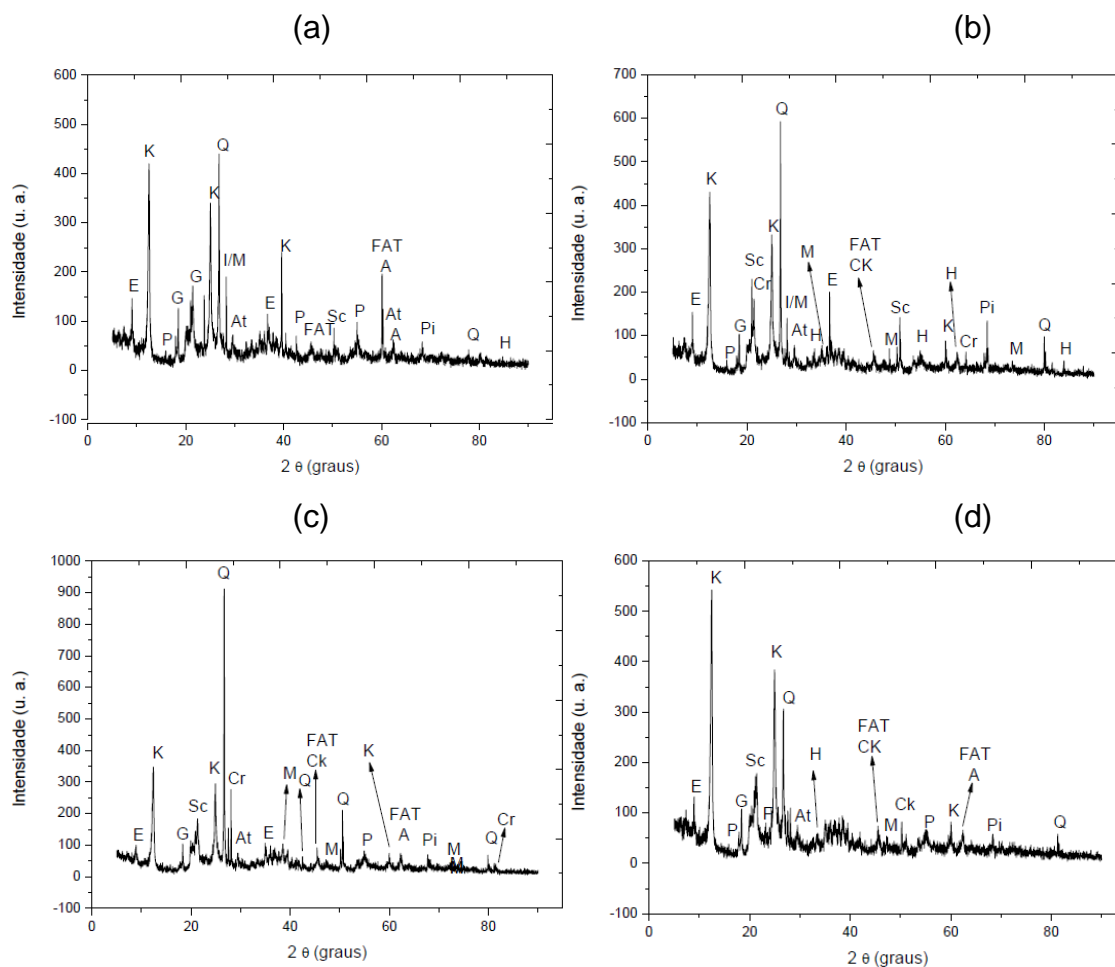


Figura de 24. Difratoograma de raios-X das mistura incorporadas com: a) 0%; b) 10; c) 20%; e c) 30% de resíduo de CBC após 28 dias de cura: E – Etringita; K- Caulinita; P – Portlandita; G – Gibsita; Q – quartzo; I/M – Ilita/Mica; At - Aluminato Tricalcio; Sc - Silicato de Cálcio Hidratado; FAT- Ferro Aluminato tetracálcio; A – Alita; Pi – Pirsonita; H – Hematita; ; M – mulita primária; Cr – cristobalita; Ck – carbonato de potássio.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

5.1. Conclusões

A partir dos resultados experimentais obtidos neste trabalho de dissertação de Mestrado pode ser concluído que:

1. O solo utilizado é composto quimicamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), hematita (Fe_2O_3), possuindo uma perda ao fogo da ordem de 10,83 %. E do ponto de vista físico apresenta alto teor de areia, partículas maiores que $63 \mu\text{m}$, da ordem de 48,0%. Portanto se trata de um solo tipicamente arenoso recomendado para a fabricação de tijolo solo-cimento.
2. O resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) utilizado é constituído, do ponto de vista químico, principalmente por sílica (SiO_2), e quantidade significativas de óxido de cálcio (CaO), óxido de potássio (K_2O), hematita (Fe_2O_3), alumina (Al_2O_3) e quantidade considerável de matéria orgânica (10,32 %), apresentando uma perda ao fogo de 9,17 %. Fisicamente apresenta alto teor de areia (87,8 %), principalmente quartzo e cristobalita com morfologia angular e partículas porosas. E do ponto de vista mineralógico, é constituído principalmente por quartzo e cristobalita, e menores quantidades de mulita primária, carbonato de potássio, fosfato de cálcio e hematita.
3. A incorporação de resíduo de CBC na mistura solo-cimento resultou em uma menor resistência à compressão e uma menor absorção de água. Já a densificação dos corpos cimentícios não foi influenciada.
4. Todos os traços fabricados apresentaram valores, médios e individuais, de resistência à compressão e absorção de água dentro das faixas estabelecidas pela norma NBR 10834 (2013) para produção de tijolo solo-cimento.
5. O resíduo de CBC pode ser utilizado como matéria-prima alternativa de baixo custo em substituição parcial do cimento na produção de tijolos solo-cimento. Pois, além de ser uma nova alternativa para reuso deste abundante resíduo, a incorporação resulta em vantagens técnicas e ainda promove uma redução no custo do produto final.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

1. Avaliar as propriedades tecnológicas de traços incorporados com maiores porcentagens de resíduo de CBC em substituição parcial do cimento, visando identificar a quantidade máxima de resíduo a ser incorporada e que ainda atenda os requisitos da NBR 10834 (2013) para produção de tijolo solo-cimento.
2. Produzir tijolos solo-cimento incorporados com resíduo de CBC e avaliar suas propriedades tecnológicas, visando seu emprego na construção civil.
3. Avaliar os efeitos da incorporação de resíduo de CBC, in natura, em substituição parcial do solo em misturas solo-cimento, visando seu emprego na fabricação de tijolos solo-cimento.
4. Realizar um estudo do potencial econômico do uso de tijolos solo-cimento incorporados com resíduo de CBC na construção de casas populares.
5. Estudar o efeito da adição do resíduo de CBC nas reações de hidratação do cimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1999) Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. ET-35. São Paulo.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002) Guia básico de utilização do cimento portland. BT-106. São Paulo.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio: NBR 6459. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988) Análise Granulométrica - Solo: NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988) Determinação de limites de plasticidade - Método de ensaio: NBR 7180. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Materiais pozolânicos: NBR 12653. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 12024. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) Bloco vazado de solo-cimento. Especificação. Método de ensaio: NBR 10834. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) Bloco vazado de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Método de ensaio: NBR 10836. Rio de Janeiro.

Banco Nacional da Habitação / CEPED. (1985) Tijolos maciços de solo-cimento: fabricação e utilização. Rio de Janeiro, 20 p. ilustr.

Borlini, M.C., Mendonça, J. L. C. C., Vieira, C.M.F., Monteiro, S. N.(2006). Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas

e macroestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana-de-açúcar. *Matéria* (Rio J.), vol.11, n° 4, 433-441p.

Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares – CEBRACE (1981). Solo-cimento na construção de escolas – SC01. 2ª ed. Rio de Janeiro, MEC/CEBRACE, 39p. il. (sistemas construtivos 2).

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CEPED (1999) Manual de construção com solo cimento. 4ª ed. Camaçari. 114 p.

Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2012). Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar, primeiro levantamento. Brasília – DF. 19 p.

Cordeiro, G.C., Toledo F. R. D., Fairbair, E.M.R.(2009). Caracterização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em material cimentícios. *Química Nova*. V.32 n° 1, 82-86p.

Cortez, L.; Magalhães, P.; Happ, J. (1992) Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. *Revista Brasileira de Energia*, Campinas, p. 111-146.

Destefani, A. Z. (2009) Utilização do planejamento experimental na adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de blocos prensados de encaixe. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 119 p.

Faria, K. C. P. (2011) Avaliação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades e microestruturas de cerâmica vermelha (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 119 p.

Faria, K. C. P., Gurgel, R. F., Holanda, J. N. F.(2004). Characterization of Sugarcane Bagasse Ash for Use in Ceramic Bodies. *Petch*, Atibaia- SP, ref - 209-015, 1049-1052p.

Fiquerola, V. (2004). Alvenaria de solo-cimento. *Revista Técnica*, Editora Pini, São Paulo-SP, nº 85.

Freire, M.N., Sousa, S.J.G., Holanda, J.N.F. (2008), Using eggshell in red wall tiles. *Waste and Resource Management*, 161:23-27.

Freitas, E. S. (2005). Caracterização de cinza de bagaço da Cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense- UENF. 97p.

Gaede, L. P. F. (2008) Gestão dos resíduos da construção civil no município de Vitória – ES e normas existentes. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 74 p.

Gomes, J. W. (1980) Tijolos de solo-cimento – solução para o problema habitacional de países em desenvolvimento.

Gomes, N.S. (2003) Influência de ativadores químicos e de adições minerais no comportamento de concretos frente a cloretos. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Santa Maria – RS, Universidade de Santa Maria – UFSM, 201p.

Grande, F. M. (2003) Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa. Tese (Mestrado em Arquitetura) -SãoCarlos- SP, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo - USP, 165p.

Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo - IPT (1985) *Utilização de blocos vazados de solo-cimento na construção de habitações*. 2ª Ed., COHAB, São Paulo, 72p.

Luxan, M.P., Madruga, F., Saavedra, J. (1989) Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete research*, London, 19:63-68.

Marques, S. K. J., Tenório, T. M., Medonça, S. F. (2012) Estudo da incorporação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em formulações para a fabricação de tijolos solo-cimento. Anais do VII Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação Palmas – TO, 7 p.

Mehta, P.K.; Monteiro, P. J. M. (1994) Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: PINI, 573p.

Moreira, J.R., Goldemberg, J., 1999, The alcohol program, *Energy Policy*, v. 27, n. 4, 229-245 p.

Neville, A. M. (1997) Propriedades do Concreto. 2a Ed., São Paulo.

Oliveira, M. P. de, Nóbrega, A. F. da, Di Campos, M. S., Barbosa, N. P. (2004) Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social. Pirassununga - SP.

Paranhos, R. J. S. (2010) Aproveitamento de resíduos de cinzas da cana de açúcar em massas cerâmicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 98 p.

Paula, M. O., Tinôco, I. F. F., Rodrigues, C. S., Silva, E. N., Souza, C. F. (2009) Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.13, n.3, 353–357 p.

Portland Cement Association - PCA (1969). Soil-cement construction handbook. Illinois, PCA, 42p.

Rosenthal, E. (2004) Cimento: Um elemento básico para o progresso e para o aquecimento global. New York Times, Nova York, Estados Unidos da América.

Santos, A. D. (2004) Estudo de propriedades de físicas e químicas de um novo cimento selador endodôntico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Ilha Solteira - SP. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 68 p.

Santos, S. (2006) Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Florianópolis- SC, Universidade Federal de Santa Catarina, 267p.

Silva, S. R. (2005) Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Belo Horizonte – MG, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 219p.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2012). Relatório Anual. Rio de Janeiro – RJ. 38 p.

Siqueira, F. B. (2013) Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 121 p.

Souza, T. I, Cardoso, A.V, (2008) Utilização de Resíduos Sólidos da Indústria de Celulose Kraft na Fabricação de Cimento: Caracterização Físico-Química, 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, PE, Brasil.

SUPERTOR (198-) O tijolo de solo cimento. Catálogo de divulgação tecnológica. SUPERTOR – Máquinas e tecnologia em solo-cimento Tijolos sem queima. [198-]. Brasil.

Vieira, C.M.F., Monteiro, S.N., Filho, J.D. (2001) Formulação de Massa de Revestimento Cerâmico com Argilas Plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP). *Cerâmica Industrial*, 6(6): 43-49.

Zampieron, S. L. M., Vieira, J. L. A. (2010) Água doce e limpa: de "dádiva" à raridade. Disponível em: <<http://www.socioambiental.org/esp/agua/pgn/>> Acesso em: 03/01/2014.