

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
LAMA DE CAL NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE UMA
MISTURA SOLO-CIMENTO

MATEUS CARVALHO AMARAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JANEIRO – 2016

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
LAMA DE CAL NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE UMA
MISTURA SOLO-CIMENTO

MATEUS CARVALHO AMARAL

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

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JANEIRO – 2016

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
LAMA DE CAL NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE UMA
MISTURA SOLO-CIMENTO

MATEUS CARVALHO AMARAL

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

Aprovado em 18 de Janeiro de 2016.

Comissão Examinadora:

Prof.^a Jean Igor Margem (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – ISE CENSA

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

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph.D, Engenharia Mecânica) – UENF

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

Orientador

DEDICATÓRIA

A Deus por tudo. Aos meus pais Eduardo Amaral e Solange Amaral, pelo amor incondicional a mim dispensado. Aos meus irmãos pelo carinho e amizade. À minha esposa Maria Clara pelo companheirismo e incentivo.

AGRADECIMENTOS

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

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

À minha avó Célia, pelo amor, carinho e amizade, representando desta forma tudo o que significa a palavra avó. E a todos os meus familiares que se alegram com essa vitória.

À Lucinéia, que quando deveria ter sido apenas uma babá, foi amiga, companheira e confidente. Se tornando 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.

A todos os meus amigos de Miracema, principalmente os amigos Rodrigo, Meneguel, Charles 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 vividos comigo momentos de descontração e os de dificuldade, amenizando de alguma forma a saudade que sentia de casa. Aos amigos do laboratório que contribuíram de forma direta para elaboração deste trabalho, de maneira especial, ao amigo Fabrício Siqueira.

À minha esposa Maria Clara, que foi amiga, companheira e sempre presente, em todas etapas deste trabalho.

Aos professores do LAMAV pela minha formação e especialmente, 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.....	XII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Justificativas.....	2
1.4 Ineditismo.....	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Tijolo solo-cimento.....	4
2.1.1. Propriedades tecnológicas.....	6
2.1.2. Aplicações.....	6
2.1.3. Vantagens.....	7
2.1.4. Desvantagens.....	8
2.2. Processo de fabricação do tijolo solo-cimento.....	9
2.2.1. Matérias-primas utilizadas.....	10
2.2.1.a. Solo.....	11
2.2.1.b. Cimento.....	13
2.2.1.b.i. Processos químicos de hidratação do cimento..	18
2.2.1.c. Água.....	19
2.3. Resíduo de lama de cal.....	20
2.3.1. Caracterização.....	24
2.3.2. Reaproveitamento de lama de cal.....	27

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....29

3.1. Aquisição e beneficiamento das matérias-primas.....	29
3.1.1. Solo.....	30
3.1.2. Cimento.....	30
3.1.3. Água.....	30
3.1.4. Resíduo de lama de cal.....	30
3.2. Caracterização das matérias-primas.....	31
3.2.1 Caracterização mineralógica.....	31
3.2.2. Caracterização química.....	31
3.2.3. Caracterização física.....	32
3.2.3. Caracterização mineralógica.....	33
3.2.4. Determinação da atividade pozolânica.....	33
3.3. Confeccção dos corpos de prova.....	34
3.3.1. Traços estudados.....	34
3.3.1.a. Preparação da mistura.....	35
3.3.1.b. Moldagem.....	36
3.3.1.c. Cura.....	37
3.4. Análise das propriedades das misturas preparadas.....	37
3.4.1. Massa específica aparente.....	38
3.4.2. Variação dimensional.....	38
3.4.3. Ensaio de resistência à compressão simples.....	39
3.4.4. Ensaio de Absorção de água.....	39
3.5. Análise de fases e microestrutural das misturas.....	39
3.5.1. Análise de fases.....	39
3.5.2. Análise microestrutural.....	40

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....41

4.1. Caracterização das matérias-primas.....	41
4.1.1. Caracterização mineralógica.....	41
4.1.1.a. Solo.....	41
4.1.1.b. Cimento.....	44

4.1.1.c. Resíduo de lama de cal.....	45
4.1.2. Caracterização química.....	46
4.1.2.a. Solo.....	46
4.1.1.b. Cimento.....	48
4.1.2.c. Resíduo de lama de cal.....	48
4.1.3. Caracterização física.....	50
4.1.3.a. Solo.....	50
4.1.3.b. Resíduo de Lama de Cal.....	53
4.1.4. Determinação da atividade pozolânica do resíduo de lama de cal.....	55
4.2. Análise das propriedades das misturas preparadas.....	55
4.2.1. Massa específica aparente.....	55
4.2.2. Variação dimensional.....	57
4.2.3. Resistência à compressão.....	58
4.2.4. Absorção de água.....	60
4.3. Análise de fases das misturas preparadas.....	62
4.4. Análise microestrutural.....	64
4.4.1. Microscopia confocal.....	64
4.4.2. Microscopia eletrônica de varredura.....	70
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	76
5.1. Conclusões.....	76
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

Lista de Figuras

Figura 2.1. Tijolo solo-cimento vazado.....	4
Figura 2.2. Fluxograma do processo de fabricação do tijolo solo-cimento (Gomes, 1980).	9
Figura 2.3. Gráfico de emissão específica de CO ₂ por tonelada de cimento (SNIC, 2013).	16
Figura 2.4. Fluxograma das possíveis rotas de contaminação humana pelos materiais e poluentes perigosos na fabricação do cimento (Santi, 2004).	17
Figura 2.5. Distribuição geográfica das empresas produtoras de celulose e papel (IBÁ, 2015).....	22
Figura 2.6. Difrátograma de raio-x da lama de cal. Onde C = calcita (WOLFF, 2008).	25
Figura 2.7. Análise térmica diferencial (ATD) e gravimétrica da lama de cal (OLIVEIRA et. al, 1999).	26
Figura 3.1. Fluxograma do procedimento experimental que foi utilizado para produção e caracterização da mistura de solo-cimento.	29
Figura 3.2 Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova cilíndricos utilizando ABNT NBR 12024 (2012) – Solo-cimento – Método A adaptada.....	35
Figura 3.3. Fluxograma das etapas de produção da mistura para confecção dos corpos de prova.....	36
Figura 4.1. Difrátograma de raios-X do solo: C - Caulinita; G - Gipsita; Go - Goetita; I/M - Ilita/Mica; Q - Quartzo.....	41
Figura 4.2. Curvas de análises térmicas diferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG) do solo utilizado.....	43

Figura 4.3. Difratoograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS utilizado no trabalho.....	44
Figura 4.4. Difratoograma de raios-X do resíduo de lama de cal utilizado no trabalho.....	45
Figura 4.5. Ficha JCPDS da Calcita nº 01 – 0837.....	46
Figura 4.6. Curva granulométrica do solo utilizado.....	50
Figura 4.7. Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de lama de cal utilizado.....	53
Figura 4.8. Microscopia eletrônica de varredura das partículas do resíduo de lama de cal: a) 200X; b) 400X; c) 600 C; e d) 1000X.....	54
Figura 4.9. Massa específica aparente versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos antes da cura, após 28 dias de cura e após secagem.....	56
Figura 4.10. Variação dimensional versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos.....	57
Figura 4.11. Resistência à compressão média versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.....	59
Figura 4.12. Valores de resistência à compressão individual versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.....	60
Figura 4.13. Absorção de água média versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.....	61
Figura 4.14. Valores de absorção de água individual obtidos no ensaio versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.....	62

Figura 4.15. Difratoograma de raios-X das mistura incorporadas com: a) 0%; b) 10%; c) 20%; e c) 30% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura.....	63
Figura 4.16. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 0% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.....	65
Figura 4.17. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 10% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.....	66
Figura 4.18. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 20% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.....	67
Figura 19. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 30% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x; (c) 430x.....	68
Figura 4.20. 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 lama de cal.....	69
Figura 4.21. Microestrutura da superfície de fratura da mistura sem resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 600x e (d) 1000x.....	70
Figura 4.22. Microestrutura da superfície de fratura do traço com 10% de resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 600x e (d) 1000x.....	71
Figura 4.23. Microestrutura da superfície de fratura do traço com 20% de resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 600x e (d) 1000x.....	72
Figura 4.24. Microestrutura da superfície de fratura do traço com 30% de resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 800x e (d) 1000x.....	73
Figura 4.25. Microestrutura da superfície de fratura dos traços estudados após 28 dias de cura com aumento de 200x: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30%.....	74

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Classificação granulométrica das partículas do solo (ABNT NBR 6502, 1995).	12
Tabela 2.2. Composição química do clínquer (ABCP, 2002).....	14
Tabela 2.3. Principais componentes do cimento Portland (NEVILLE, 1997)....	15
Tabela 2.4. Principais países produtores de celulose do mundo (IBÁ, 2015)...	21
Tabela 2.5. Os principais produtores de papel do mundo e suas respectivas produções (IBÁ, 2015).....	21
Tabela 2.6. Composição química de alguns resíduos de lama de cal encontrados na literatura.	24
Tabela 2.7: Análise mineralógica da calcita tradicional e resíduo de lama de cal (NEVES, 2013).	25
Tabela 2.8: Distribuição granulométrica do resíduo de lama de cal segundo Wolff (2008).	26
Tabela 3.1. Caracterização física do cimento Portland CP III – 40RS.....	33
Tabela 3.2. Composição dos traços que foram utilizados na produção dos corpos de prova.....	34
Tabela 3.3. Valores exigidos de resistência à compressão e absorção de água para tijolos solo-cimento (ABNT NBR 10834, 2012).....	37
Tabela 4.1. Composição química do solo usado.....	47
Tabela 4.2. Composição química do cimento CP III-40RS utilizado.....	48
Tabela 4.3. Composição química do resíduo de lama de cal utilizado.....	49

Tabela 4.4. Classificação granulométrica do solo e as recomendadas pelo CEPED (1999) e ABCP (2002).....	51
Tabela 4. 5. - Massa específica real dos grãos de alguns minerais (SIQUEIRA, 2013).....	52
Tabela 4.6. Limites de consistência do solo arenoso e os recomendados pela ABCP (1985) e pelo CEPED (1999).....	52
Tabela 4.7. Classificação granulométrica do resíduo empregado e a descrita por Wolff (2008).....	54
Tabela 4.8. Classificação da atividade pozolânica e o índice de atividade do resíduo de lama de cal obtido utilizando o método de Luxan et al. (1989).....	55

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

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE LAMA DE CAL NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE UMA MISTURA SOLO-CIMENTO

Mateus Carvalho Amaral

18 de Janeiro de 2016

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

Neste trabalho o resíduo de lama de cal foi submetido à caracterização tecnológica e avaliado quanto à viabilidade de ser incorporado na composição da mistura solo-cimento, em substituição parcial do cimento Portland, 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 lama de cal 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 ABNT NBR 12024 (2012) – 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 massa específica aparente, variação dimensional, resistência à compressão simples, absorção de água e microestrutura. Os resultados mostraram que a incorporação de resíduo de lama de cal reduziu a resistência à compressão, para teores acima de 10% de resíduo, e aumentou absorção de água, para teores acima de 20% de resíduo, das misturas. Já a densificação da mistura aumentou com a incorporação. Foi visto que os traços estudados com até 20% de resíduo são viáveis para a fabricação do tijolo solo-cimento de acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10834 (2012) - Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. As melhores propriedades foram obtidas com a incorporação de 10% de resíduo na mistura solo-cimento. Não foram observadas mudanças microestrutural e de fases devido a adição de resíduo.

Abstract of Thesis presented to the CCT-UENF as part of the requirements for the degree of Doctor of Engineering and Materials Science.

EVALUATION OF EFFECTS OF LIME MUD WASTE OF MERGER ON PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF A MIXTURE SOIL-CEMENT

Mateus Carvalho Amaral

18 of Janeiro of 2016

Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda

In this work the lime mud residue was subjected to technological characterization and evaluated for viability to be incorporated into of soil-cement mixture in partial replacement of Portland cement to be used as a new cementitious material, more specifically in the manufacture of soil-cement bricks. Cylindrical specimens soil-cement containing 0%, 10%, 20% and 30% by weight of lime mud residue in the cement replacement, and 16% moisture content were made by uniaxial pressing. A load of 2 tons was used and the procedures described in ABNT NBR 12024 (2012) - Soil-Cement - Method A. The obtained samples were subjected to the process of healing in a moist chamber for 28 days. After cured the specimens were characterized in terms of bulk density, dimensional change, resistance to simple compression, water absorption and microstructure. The results showed that the incorporation of lime mud residue of reduced compressive strength to levels above 10% waste, and increased water absorption to levels above 20% residue, mixtures. Since the densification of the mixture increased with the merger. It has been seen that the traits studied with up to 20% of waste is viable to manufacture soil-cement brick according to the criteria established by NBR 10834 (2012) - soil-cement leaked block without structural function. The best properties were obtained with the incorporation of 10% residue on the soil-cement mixture. Therefore, the partial replacement of cement by this residue is viable and advantageous.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A crescente necessidade de preservação ambiental e a tendência de escassez dos recursos naturais têm forçado à todos a adquirir novos conceitos e soluções técnicas que visem a sustentabilidade de suas atividades (SOUZA, 2008). 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. A economia de matérias-primas naturais, as poucas modificações no processo produtivo, a larga variabilidade da composição química e mineralógica e a possibilidade de inertizar o resíduo poluente na matriz cerâmica têm contribuído para este cenário (FREIRE *et al.*, 2008).

O Brasil é considerado o quarto maior produtor de celulose e nono de papel do mundo (IBÁ, 2015). A atividade da indústria de celulose tem sido ao longo dos últimos anos uma das principais fontes de riqueza do país. Porém, o processo produtivo das usinas gera grandes quantidades de resíduos, sendo que um deles é o de lama de cal. Muitas vezes, este resíduo é descartado em aterros próximos as fábricas, mas ainda assim podem causar sérios problemas ambientais além do custo de manutenção do aterro ser muito elevado (BRACELPA, 2014).

Desta forma, esta tese de doutorado analisa a viabilidade de incorporar o resíduo de lama de cal numa mistura de solo-cimento em substituição parcial ao cimento Portland, 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 tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de incorporação de resíduo de lama de cal numa mistura solo-cimento em substituição parcial ao cimento Portland, visando o seu emprego como material cimentício, particularmente em tijolos solo-cimento.

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Caracterização mineralógica, química e física e das matérias-primas;
- b) Avaliação do efeito da adição do resíduo nas propriedades tecnológicas (densidade aparente, variação dimensional, resistência à compressão e absorção de água) das misturas preparadas após 28 dias de cura.
- c) Avaliação de fases e microestrutural 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.

O Brasil apresenta destacado lugar na produção mundial de papel e celulose e com potencial ainda maior de desenvolvimento nessa área, com crescimento médio anual de 7,1%. Por consequência, é gerada uma grande quantidade de resíduo, aproximadamente 13,4 milhões de toneladas, dentre eles o de lama de cal (IBÁ, 2015).

O uso do cimento é fundamental para o progresso de qualquer país, por ser o principal constituinte do concreto. O Brasil é o quinto maior produtor e o quarto maior consumidor de cimento do mundo, sendo a região sudeste a maior consumidora (SNIC, 2013). 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 da celulose brasileira gera em média 283 mil toneladas de resíduo de lama de cal (SIQUEIRA, 2013). Esta tese de doutorado, que trata da avaliação da incorporação de resíduo de lama de cal, em substituição parcial do cimento Portland, em uma mistura solo-cimento para fabricação de tijolo, espera contribuir com mais uma opção de valorização deste resíduo e também com a redução do uso do cimento.

1.4. Ineditismo

Na literatura são encontrados diversos estudos para reaproveitamento do resíduo de lama de cal como fonte alternativa de carbonato de cálcio, por exemplo: como corretivo de solo agrícola, pavimentação de estradas, produção de cal virgem, fabricação de cimento, produção de cerâmica vermelha e outros. Às vezes ele também é descartado em aterros industriais ou urbanos próximos das fábricas de celulose, porém esta alternativa não é muito viável devido o alto custo de manutenção do aterro. Mas existe uma lacuna sobre o reuso deste resíduo para produção de tijolos vazados de solo-cimento sem função estrutural e de informações sobre o efeito deste resíduo nas propriedades tecnológicas e microestrutura do solo-cimento.

Sendo assim, esta tese avalia os efeitos da adição do resíduo de lama de cal proveniente da indústria da celulose em uma mistura de solo-cimento em substituição parcial do cimento Portland e a viabilidade de utilizar essa mistura para a fabricação de tijolos vazados de solo-cimento sem função estrutural.

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. Em outras palavras, pode ser descrito também como sendo uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e eventualmente aditivos em proporções adequadas que atendam os requisitos técnicos exigidos por norma (ABNT NBR 10834, 2012)

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 tipo de tijolo solo-cimento.



Figura 2.1. Tijolo solo-cimento vazado.

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 Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED) 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, atraente para indústria da construção civil.

2.1.1. 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 variação 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 argila 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).

2.1.2. 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.

2.1.3. 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).

2.1.4. Desvantagens

Os tijolos solo-cimento também apresentam certas desvantagens como todos os outros produtos. Porém pode ser observado que existe pouca coisa na literatura descrevendo estas desvantagens. Pode ser dito que existe um principal fator e a partir dele temos a origem das outras desvantagens alimentando um ciclo vicioso. O principal fator seria que a tecnologia de construção não é difundida, logo poucos profissionais sabem utilizar este tipo de alvenaria, assim não se tem uma grande demanda por este produto, que provoca uma baixa oferta o que por fim cria muitas dificuldades para quem decide por sua utilização (PORTELA).

Abaixo são apresentadas algumas outras desvantagens:

- Custo do milheiro superior quando comparado aos similares de argila sinterizada, aos tijolos de 6 furos e outros;
- Menor disponibilidade devido à quantidade reduzida de fábricas quando comparado ao tijolo de seis furos;
- Como a construção geralmente é estrutural limita as modificações futuras;
- Caso for utilizado tijolos a vista, a quebra ou mudança de paredes podem deixar evidenciados os cortes no tijolos ou remendos se necessários (PORTELA);

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.

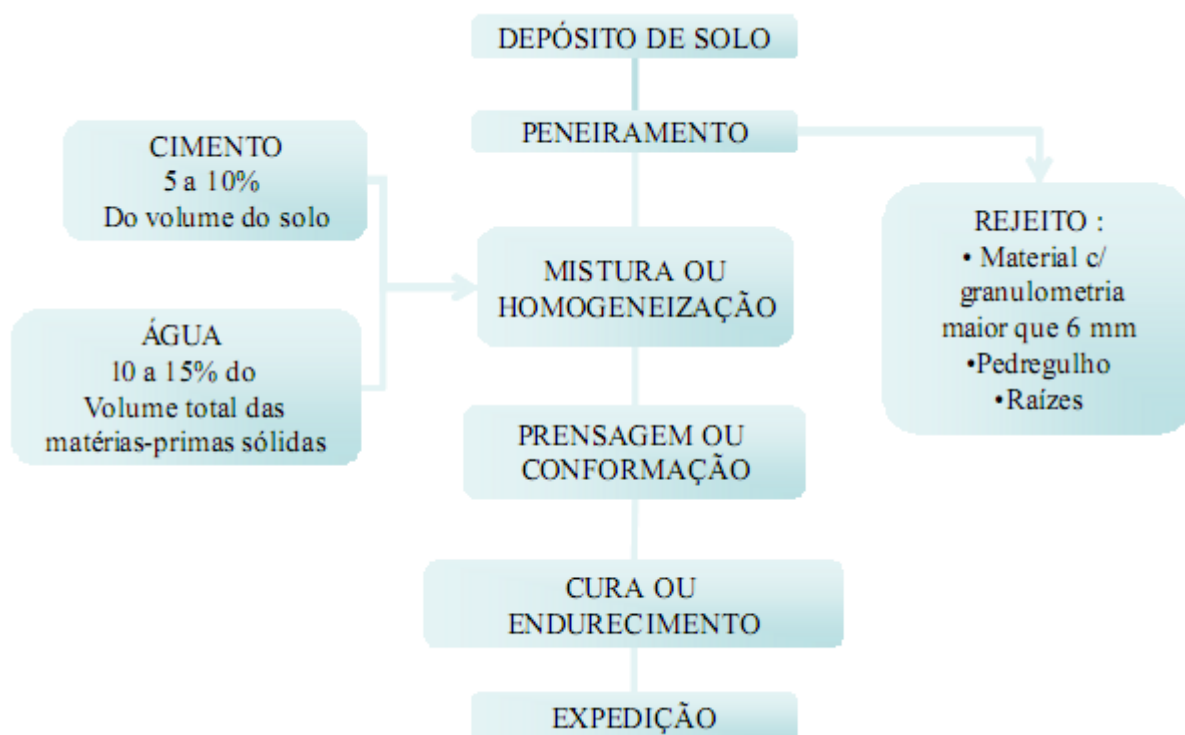


Figura 2.2. Fluxograma do processo de fabricação do tijolo solo-cimento (GOMES, 1980).

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 visando 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 garantindo 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 esfarelamento 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 lama de cal também foi usado

como uma matéria-prima alternativa em substituição parcial do cimento. A seguir será feita uma descrição sucinta destes materiais.

2.2.1.a. 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). Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6502 (1995, p. 17) apresenta a seguinte definição para solo: “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica”.

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 segundo os critérios da ABNT NBR 6502 (1995).

Tabela 2.1. Classificação granulométrica das partículas do solo (ABNT NBR 6502, 1995).

Classificação	Diâmetro da partícula (mm)
Pedregulho	2 –60
Areia	0,06 – 2
Areia grossa	0,60 – 2
Areia média	0,20 – 0,60
Areia fina	0,006 – 0,2
Silte	0,002 – 0,06
Argila	Inferior a 0,002

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 argilominerais, 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, preferencialmente, 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.b. 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 anidro sulfúrico (SO_3), em menores quantidades (Santos, 2004). O anidro 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	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	42 – 60
Silicato dicálcio	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	14 – 35
Aluminato tricálcio	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	6 – 13
Ferroaluminato tetracálcio	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5 – 10
Gesso	CaSO ₄ .H ₂ O	CSH ₂	1 – 4

Notação: CaO - C; SiO₂ - S; Al₂O₃ - A; Fe₂O₃ - F; SO₃ - S; H₂O - 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 2013, o país ocupou a 5^a posição no ranking de produção de cimento mundial com aproximadamente 70,2 milhões de toneladas e a 4^o posição do ranking de consumo, com 71 milhões de toneladas (SNIC, 2013).

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 (CO₂), 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).

A indústria do cimento brasileira vem se destacando como a mais eficiente no controle de emissões de gases do efeito estufa ao longo dos anos. Isto foi possível devido à utilização de combustíveis alternativos (biomassas e resíduos) e adições (escória de alto forno, cinzas volantes e outras) na produção. Na Figura 2.3 é apresentado o gráfico de emissão específica de CO₂ por tonelada de cimento. Pode ser visto que o Brasil em 1990 já ocupava uma posição de privilegiada e que veio reduzindo as emissões até 2005. As reduções percentuais são menores a cada ano, pois devido a alta eficiência cada redução requer muito esforço. E em 2012 o Brasil ocupou a posição de menor emissor de CO₂ por tonelada de cimento (SNIC, 2013).

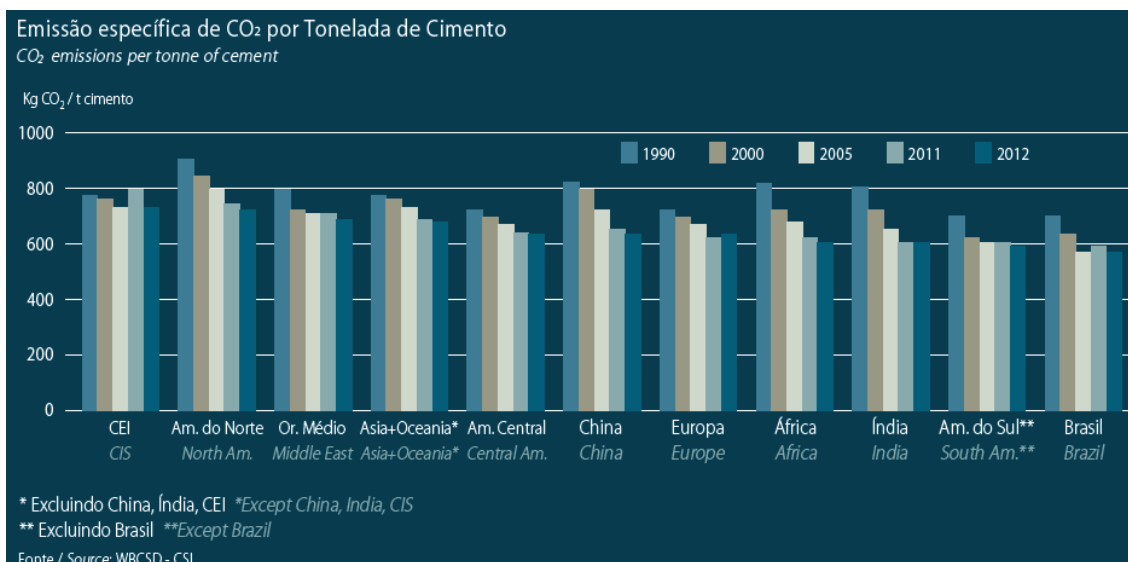


Figura 2.3. Gráfico de emissão específica de CO₂ por tonelada de cimento (SNIC, 2013).

Na Figura 2.4 está apresentado um esquema de possíveis maneiras de contaminação do homem pelos materiais poluentes produzidos pelas fábricas de cimento (CARVALHO, 2008).

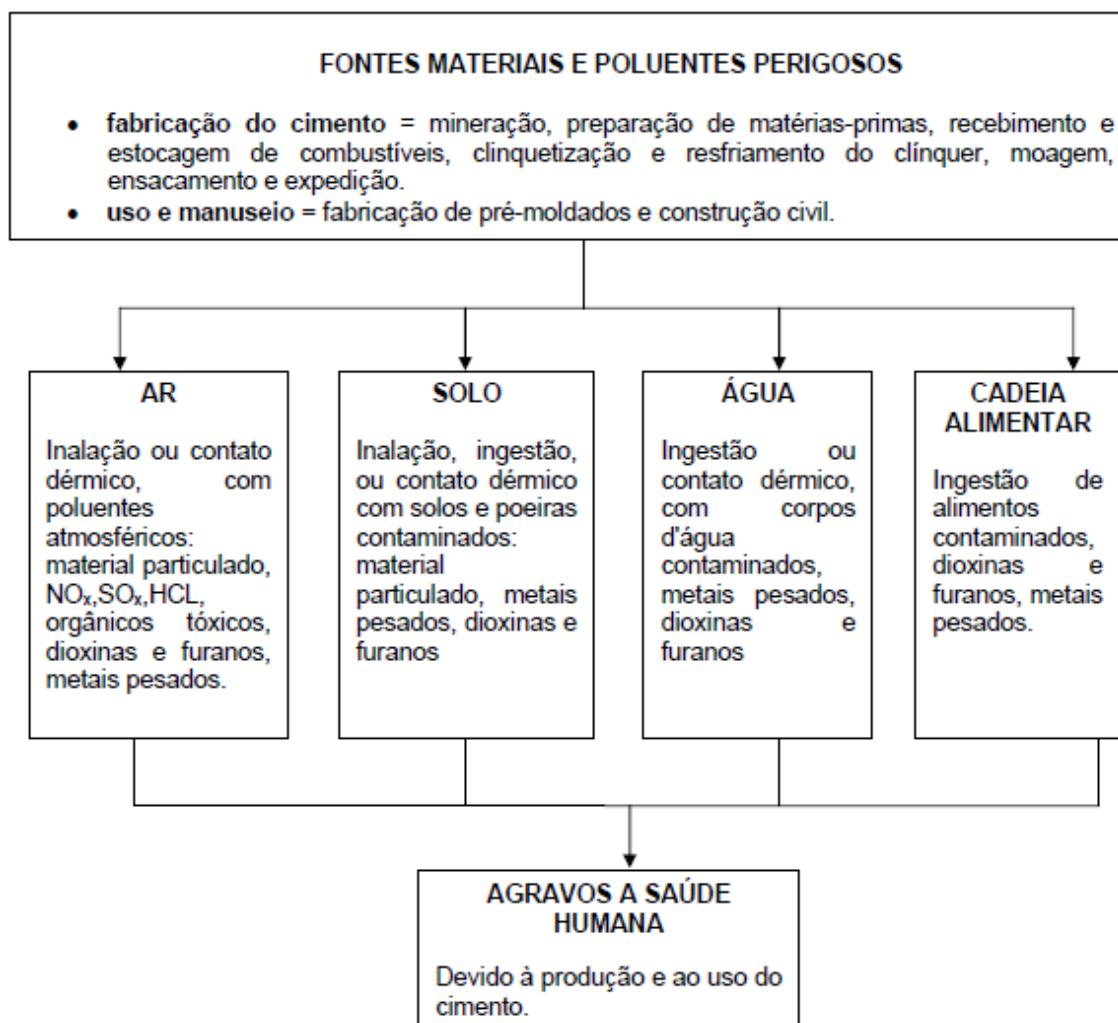


Figura 2.4. Fluxograma das possíveis rotas de contaminação humana pelos materiais e poluentes perigosos na fabricação do cimento (SANTI e FILHO, 2004).

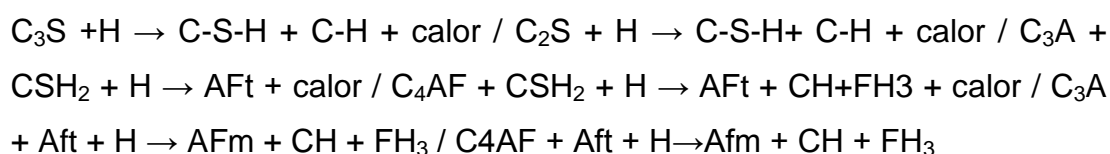
Devido à atual e crescente preocupação do homem com a escassez dos recursos naturais e o meio ambiente, cada vez mais é necessário à busca por soluções que minimizem os impactos ambientais causados pelas cimenteiras e materiais que possam substituir ou diminuir o uso de cimento. Logo este trabalho se 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 lama de cal pode diminuir a quantidade de cimento necessária em sua composição.

2.2.1.b.i. 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, 2004):



Mas na verdade a reação de hidratação é uma composição das várias reações apresentadas abaixo (FARIA, 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.c. 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 e VIEIRA, 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 e VIEIRA, 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 e VIEIRA, 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.

2.3. Resíduo de lama de cal

As fibras (celulose e pastas) são o principal insumo para a produção de papéis e são classificadas em:

- curta: Proveniente principalmente do eucalipto, comprimento entre 0,5 mm e 2,0 mm. Possui uma resistência menor que a fibra longa. Utilizada para fabricação de papéis de imprimir, escrever e de fins sanitários.
- longa: Deriva geralmente de pinus, comprimento entre 2 mm e 5 mm. Utilizada na fabricação de papéis que exigem maior resistência, como os de embalagens e papel jornal; e
- pastas de alto rendimento (IBÁ, 2015).

A vantagem brasileira na atividade florestal pode ser vista na competitividade no setor de celulose, em que o país é o 4º maior produtor mundial de celulose de todos os tipos e 1º produtor mundial de celulose de eucalipto. Em 2014 a produção brasileira de celulose foi de 16,5 milhões de toneladas, com saldo comercial de 4,95 bilhões de dólares. Já a de papel foi de 10,4 milhões de toneladas, com saldo comercial de 480 milhões de dólares, ocupando a 9ª posição mundial (IBÁ, 2015). Os investimentos previstos para esta área no triênio de 2015-2018 são de 21 bilhões de reais, 1 bilhão a mais que o triênio 2010-2013 (BNDES, 2013). Na Tabela 2.4 são apresentados os principais produtores de celulose do mundo e sua respectiva produção.

Tabela 2.4. Principais países produtores de celulose do mundo (IBÁ, 2015).

	País / Country	Milhões (t) <i>Million (t)</i>
1º	EUA <i>USA</i>	57,42
2º	China <i>China</i>	18,88
3º	Canadá <i>Canada</i>	17,29
4º	Brasil <i>Brazil</i>	16,46
5º	Suécia <i>Sweden</i>	11,50

Na Tabela 2.5 apresenta os 5 maiores produtores de papel do mundo, o Brasil e suas respectivas produções.

Tabela 2.5. Os principais produtores de papel do mundo e suas respectivas produções (IBÁ, 2015).

	País / Country	Milhões (t) <i>Million (t)</i>
1º	China <i>China</i>	106,61
2º	EUA <i>USA</i>	72,88
3º	Japão <i>Japan</i>	25,12
4º	Alemanha <i>Germany</i>	22,10
5º	Suécia <i>Sweden</i>	11,49
9º	Brasil <i>Brazil</i>	10,40

No Brasil, os setores de celulose e papel contam com cerca de 220 empresas em 17 estados, num total de 450 municípios e 114 mil empregos diretos gerados. Considerando-se a celulose de mercado, o número de produtoras brasileiras é bem menor, representado fundamentalmente por cinco empresas – Fibria, Veracel (50% Fibria e 50% Stora Enso), Suzano, Orsa e Cenibra, cujos custos de produção estão entre os menores do mundo (IBÁ, 2015). Na Figura 2.5 é apresentada a distribuição geográfica das empresas produtoras de celulose e papel.

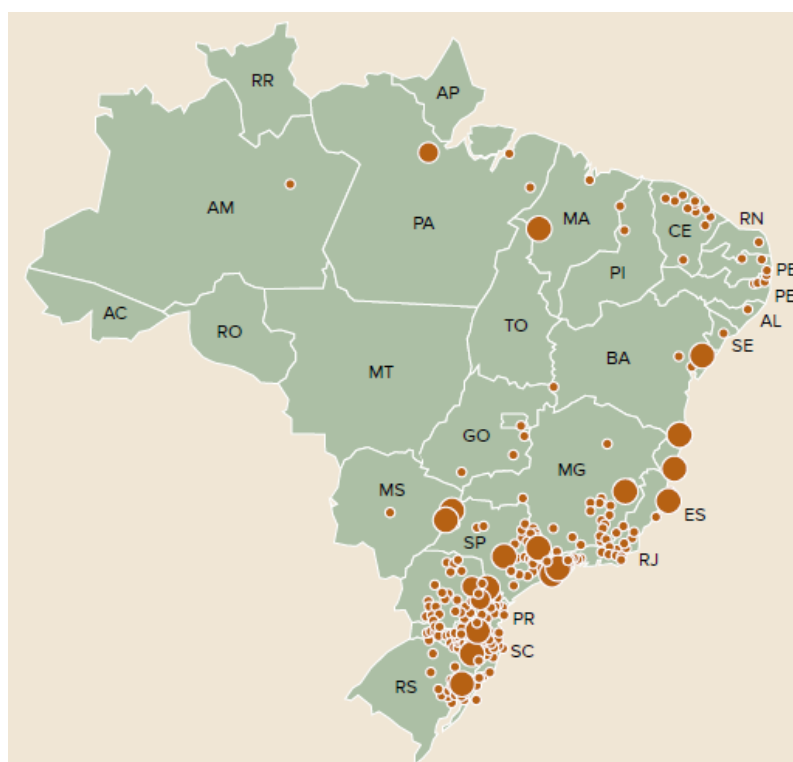


Figura 2.5. Distribuição geográfica das empresas produtoras de celulose e papel (IBÁ, 2015).

Os principais resíduos sólidos gerados no processo de fabricação da celulose são lenhosos (casca de madeira e serragem), lamas primárias e biológicas, sólidos alcalinos (dregs, grits e lama de cal), resíduos de celulose e cinzas das caldeiras de biomassa (BELLOTE *et al.*, 1998; GUERRA, 2007). Esses resíduos variam em composição química e quantidade segundo a eficiência do processo de extração da celulose (RODRIGUES, 2004).

A lama de cal é um resíduo sólido, cinza claro, homogêneo e sem odor característico proveniente da etapa de “caustificação” do processo de

fabricação da celulose (ALBUQUERQUE, 2011). É constituído basicamente de óxido de cálcio (CaO) e possui outros óxidos em pequenas proporções como: Al_2O_3 , MgO, Fe_2O_3 , CaO e outros, cujo o teor pode variar de acordo com a eficiência do processo.

Pode ser visto que existe muita informação divergente na literatura sobre a quantidade de resíduo de lama de cal produzido no Brasil, porém de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2015), que é atualmente o órgão responsável, a geração de resíduos sólidos pelas atividades industriais do setor de celulose foi de 13,40 milhões de toneladas em 2014, sendo que 5,5% são de lama de cal e cinza de caldeira. Portanto a informação apresentada por Siqueira (2013) que a indústria da celulose gera em média 283 mil toneladas de resíduo de lama de cal por ano é coerente, embora este valor possa ser ainda maior visto que a produção de celulose aumentou neste período.

2.3.1. Caracterização

Como já foi dito anteriormente o resíduo de lama de cal é constituído basicamente de óxido de cálcio (CaO) e outros óxidos que variam em quantidade de acordo com a eficiência do processo.

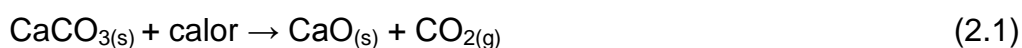
Na Tabela 2.6 é apresentada a composição química de alguns resíduos de lama de cal encontrados na literatura.

Tabela 2.6. Composição química de alguns resíduos de lama de cal encontrados na literatura.

Óxido	WOLFF, (2008) (%)	OLIVEIRA <i>et al.</i> , (1999) (%)
CaO	55,80	53,22
MgO	0,55	0,83
SiO ₂	0,98	0,37
Al ₂ O ₃	0,15	1,96
Fe ₂ O ₃	0,18	0,09
Cl	-	-
Na ₂ O	0,37	0,74
Outros	0,09	0,07
PF (1000 °C)	41,05	42,72

PF = perda ao fogo.

Pode ser visto que este resíduo é constituído basicamente de óxido de cálcio (CaO). O alto percentual de CaO e de perda ao fogo (PF) se deve fundamentalmente a decomposição da calcita (CaCO₃). De acordo com a reação abaixo:



No trabalho de Wolff (2008) também foi realizada a caracterização mineralógica do resíduo que é apresentada na Figura 2.6. Onde fica evidenciado a presença da calcita (CaCO₃) em coerência com a caracterização química de seu trabalho e dos demais apresentados na Tabela 2.6.

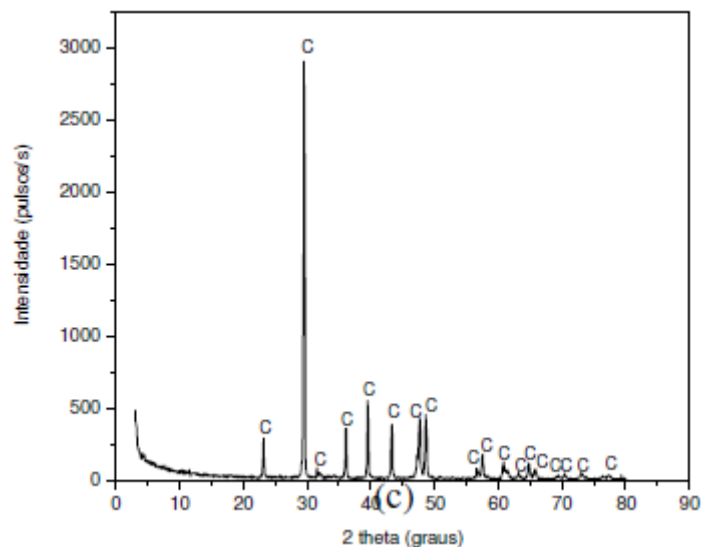


Figura 2.6. Difratoograma de raio-x da lama de cal. Onde C = calcita (WOLFF, 2008).

Neves (2013) em seu trabalho faz uma comparação entre a lama de cal e a calcita tradicional e verifica que o resíduo possui maior quantidade de calcita (CaCO_3) e maior pureza. A Tabela 2.7 apresenta essa comparação.

Tabela 2.7: Análise mineralógica da calcita tradicional e resíduo de lama de cal (NEVES, 2013).

Mineral	Quartzo	Ilita	Calcita	Dolomita	Outros
Calcita Tradicional	3	2	83	12	
Resíduo de lama de cal	3		91		6

No trabalho de Wolff (2008) também foi realizada a distribuição granulométrica da lama de cal que é apresentada na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Distribuição granulométrica do resíduo de lama de cal segundo Wolff (2008).

Classificação	Diâmetro da partícula (mm)	Resíduo de lama de cal (%)
Areia fina, grossa, areia	Maior que 0,075	3
Silte	0,002 – 0,075	90
Argila	Inferior a 0,002	7

Pode ser visto que este resíduo é constituído basicamente por partículas da fração silte

Na Figura 2.7 é o resultado dos ensaios de análise térmica diferencial (ATD) e gravimétrica (ATG) da lama de cal realizados por Oliveira *et al.* (1999). Pode ser observado um pico endotérmico a aproximadamente 855 °C e perda de massa de na faixa de 43%. Este evento provavelmente esta relacionado à decomposição da calcita (CaCO_3) e liberação de dióxido de carbono (CO_2) conforme apresentado na reação 1 e em plena consonância com os dados de composição química, onde se tem uma elevada quantidade de óxido de cálcio (CaO) e alto percentual de perda ao fogo (PF).

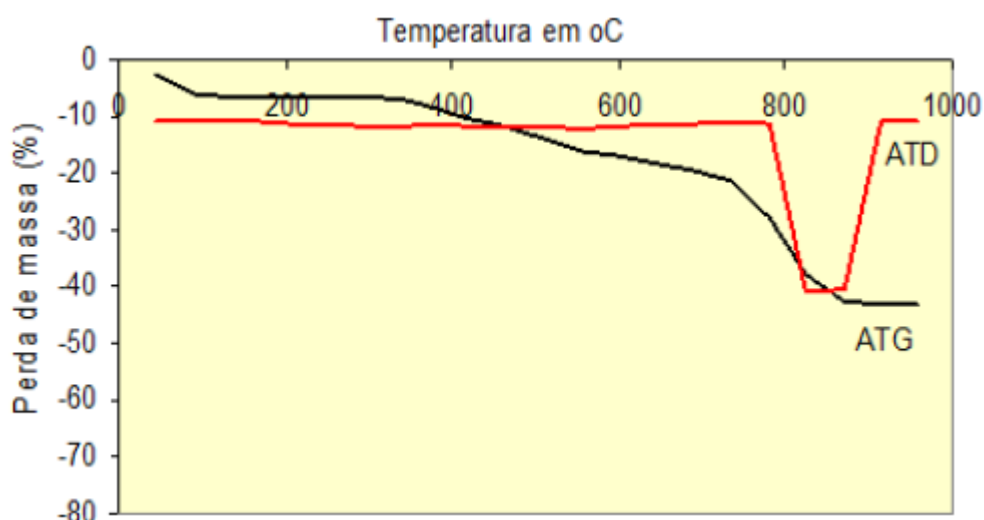


Figura 2.7. Análise térmica diferencial (ATD) e gravimétrica da lama de cal (OLIVEIRA *et al.*, 1999).

2.3.2. Reaproveitamento de lama de cal

O resíduo de lama de cal é classificado segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) como sendo da classe II A, não perigoso e não inerte. Porém sua disposição de forma incorreta pode causar danos ao meio ambiente como: poluição do ar, das águas superficiais e subterrâneas. Segundo o Ibá (2015) este resíduo é reutilizado, geralmente, como matéria prima por outros setores da indústria, por exemplo: para a fabricação de cimento.

A reciclagem do resíduo de lama de cal pode trazer vantagens econômicas e ambientais. Porque pode ser utilizado como fonte alternativa de carbonato de cálcio de menor custo e contribuir para redução do impacto sobre as reservas de rochas calcárias, que é um recurso natural não renovável (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Diversas pesquisas foram e vem sendo realizadas para oferecer maneiras de reaproveitar este resíduo. De uma forma geral, esse resíduo vem sendo utilizado para correção da acidez do solo que é bem comum no Brasil, mas o teor de sódio presente no resíduo deve ser baixo para evitar consequências como: dispersão de argilas e desestruturação do solo (CORRÊA *et al.*, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2007, SIMONETE *et al.*, 2013). Albuquerque (2011) verificou a possibilidade de utilizar o resíduo como uma alternativa para correção da fertilidade do solo, no cultivo de bambu e concluiu que aumentou os teores de potássio (K) nas folhas de bambu e não houve sintomas de toxidez.

Oliveira *et al.* (2000) adicionaram este resíduo em revestimento cerâmico tipo semi gres em diferentes proporções e concluíram que até 3% em peso deste resíduo atua como fundente e contribui para reduzir a absorção de água. Neves (2013) investigou os efeitos da incorporação deste resíduo em revestimento cerâmico poroso em substituição a calcita tradicional e concluiu que houve vantagens como aumento da estabilidade dimensional, redução do percentual de carbonatos e clareação da cor da massa.

Izidio *et al.* (2014) incorporaram este resíduo em massa argilosa para fabricação de tijolos sinterizados e concluíram que é viável a utilização deste resíduo como matéria prima na indústria da cerâmica vermelha e que a

incorporação apresentou vantagens como: redução da absorção de água e da retração linear.

A idéia de incorporar a lama de cal em tijolo solo-cimento surgiu com o intuito de oferecer mais uma forma de reciclagem para este resíduo e foi fortalecida com a possibilidade de diminuir a quantidade de cimento necessária para a estabilização do tijolo, a partir do conhecimento prévio da composição do cimento e do resíduo de lama de cal. O que resultaria 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).

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos que foram utilizados no desenvolvimento da mistura de solo-cimento incorporada com o resíduo de lama de cal. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma das etapas que foram desenvolvidas neste trabalho de doutorado.

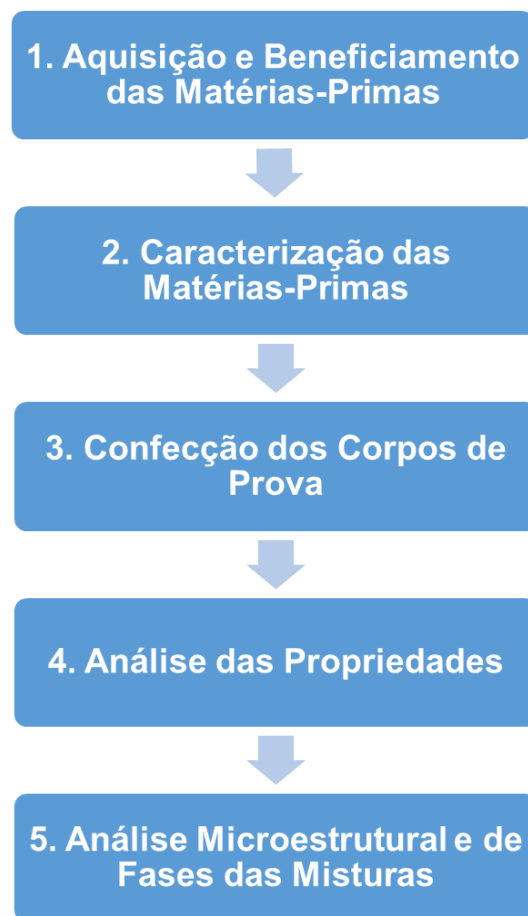


Figura 3.1. Fluxograma do procedimento experimental que utilizado.

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 Lama de Cal.

3.1.1. Solo

O solo arenoso foi coletado na empresa Artecerâmica 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 a 110 °C, durante 24 horas, a fim de eliminar a umidade residual.

Após secagem, o solo foi submetido ao processo de peneiramento, onde foi peneirado para a fração <4,0 mesh, utilizando a peneira n° 4 ASTM (4,75 mm). Por fim, o solo beneficiado foi armazenado em uma embalagem plástica devidamente tampada, para evitar a absorção de umidade.

3.1.2. Cimento

O cimento Portland utilizado neste trabalho foi do tipo CP III – 40 RS, 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 lama de cal

O resíduo de lama de cal que foi utilizado neste trabalho foi coletado como rejeito da FIBRIA CELULOSE, indústria localizada na unidade de Aracruz em Barra do Riacho-ES. Após a coleta, o resíduo de lama de cal in natura foi

posto na estufa a 110 °C por aproximadamente 60 minutos para eliminar a umidade residual e evitar a sua deterioração. E depois 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 mineralógica

Análise 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 (Joint Comitee of Powder Diffraction Standards).

Também foram feitas análises térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (TG/DTG) do solo utilizado, 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 química

A composição química 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) será 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 com taxa de aquecimento de 10 °C/min (g).

3.2.3. Caracterização física

Foi realizada a análise do tamanho de partícula utilizando os procedimentos de peneiramento/sedimentação de acordo com ABNT NBR 7181 (1988). A massa específica real dos grãos foi determinada via a técnica de picnometria.

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

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

onde:

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).

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 Tempo de fim de pega	NBR NM 65/2003	250 min 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

Foi analisada a morfologia do resíduo de lama de cal 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.

3.2.4. Determinação da atividade pozolânica

Foi determinada a atividade pozolânica da lama de cal de acordo com 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 lama de cal, 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 μS/cm.
- Com atividade pozolânica moderada: entre 0,4 μS/cm e 1,2 μS/cm.
- Com boa atividade pozolânica: > 1,2 μS/cm.

3.3. Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos incorporados com diferentes proporções de resíduo de lama de cal foram obtidos por prensagem uniaxial sendo feita uma adaptação dos procedimentos descritos na norma ABNT NBR 12024 (2012).

3.3.1. Traços estudados

A Tabela 3.2 apresenta a composição dos traços que foram 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 lama de cal 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 (256 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 que foram utilizados na produção dos corpos de prova.

Traço ($A_{\%}$ de resíduo)	Solo (g)	Cimento (g)	Resíduo (g)	Total (g)
A_0	1440	160	0	1600
A_{10}	1440	144	16	1600
A_{20}	1440	128	32	1600
A_{30}	1440	112	48	1600

Na figura 3.2 é apresentado um fluxograma das etapas envolvidas na fabricação destes corpos de prova e em seguida é feita uma descrição destas etapas.



Figura 3.2. Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova cilíndricos utilizando ABNT NBR 12024 (2012) – Solo-cimento – Método A adaptada.

3.3.1.a. 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, disponível no LAMAV/UENF.

Na Figura 3.3 é mostrada a sequência de etapas para produção da mistura para confecção dos corpos de prova. Abaixo é feita uma descrição dos procedimentos.

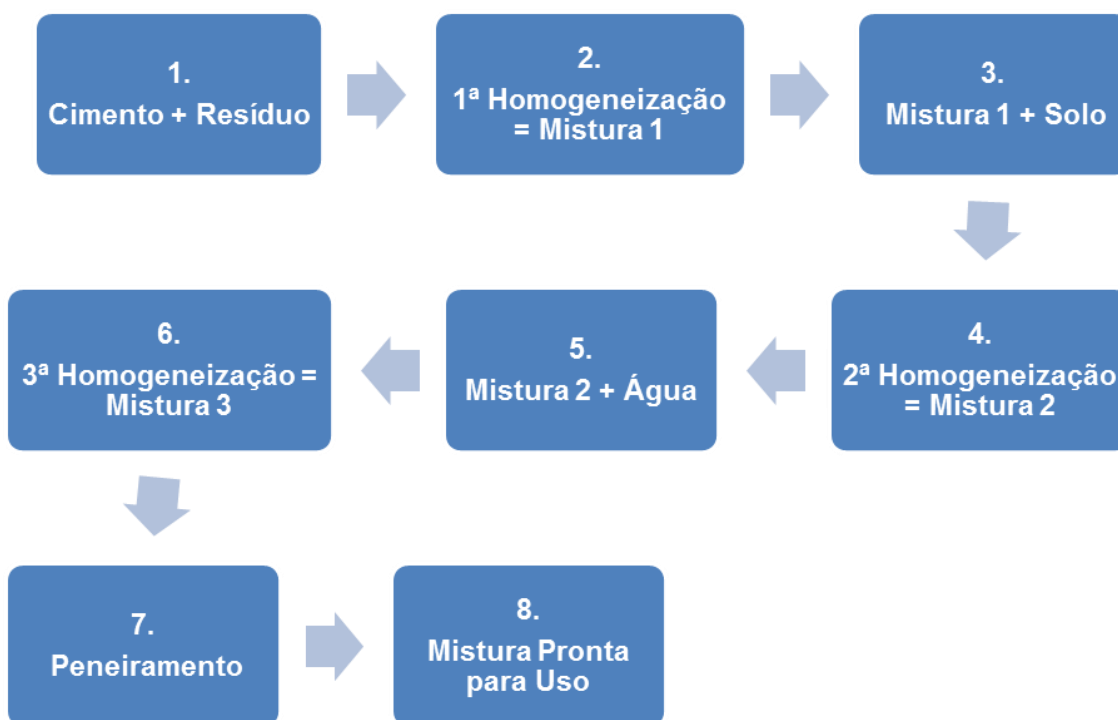


Figura 3.3. Fluxograma das etapas de produção da mistura para confecção dos corpos de prova.

Inicialmente o resíduo de lama de cal foi colocado junto com o cimento, então foram misturados manualmente até se obter 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 (4,75 mm) 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.b. Moldagem

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. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos de aproximadamente 37 mm de diâmetro e 75 mm de altura.

3.3.1.c. 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 e colocados na câmara úmida onde permaneceram até a idade de 28 dias para a realização dos ensaios conforme ABNT NBR 12024 (2012).

3.4. Análise das propriedades das misturas preparadas

Neste trabalho foram estudadas as propriedades de massa específica aparente, variação dimensional, resistência à compressão e absorção de água 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 ABNT NBR 10834 (2012) 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 (ABNT NBR 10834, 2012).

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

3.4.1. 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, de fabricação da Gehaka I. O diâmetro e a altura dos corpos de prova foram medidos com o auxílio de um paquímetro digital Miltutoyo ($\pm 0,01$).

3.4.2. Variação dimensional

A variação dimensional (VD), em relação ao volume (V), altura (L) e diâmetro (d), dos corpos de prova das misturas estudadas foi determinada após 28 dias de cura de acordo com a seguinte expressão:

$$VD \text{ (\%)} = [(X_u - X_c) / X_u]100 \quad (3.4)$$

X_u = é o parâmetro (V , L ou d) do corpo de prova cilíndrico após moldagem (cm^3);

X_c = é o parâmetro (V , L ou d) do corpo de prova cilíndrico após a cura (cm^3);

3.4.3. Ensaio de resistência à compressão simples

Para a realização deste ensaio, os corpos de prova, após 28 dias de cura, foram previamente capeados com placas de alumínio, de 1 mm de espessura, que foram coladas em suas extremidades com auxílio de um adesivo instantâneo a base de resina epóxi (Araldite). Após 24 horas, tempo total para a cura da cola, os corpos de prova foram ensaiados de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR 12025 (2012), com o auxílio de uma máquina de ensaios universal, modelo 5582, de fabricação da Instron, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

3.4.4. Ensaio de absorção de água

A determinação da absorção de água dos corpos de prova cilíndricos foi realizada seguindo os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 13555 (2012). Na realização deste ensaio foram utilizados corpos de prova, com idade de 28 dias, uma balança digital BG-2000 Classe II, de fabricação da Gehaka, a estufa da Brasdonto, modelo 3, e um recipiente plástico, que foi utilizado como tanque de imersão. A absorção de água (AA) foi calculada utilizando a expressão (3.5):

$$AA (\%) = (m_u - m_s / m_s) 100 \quad (3.5)$$

onde:

m_s = é a massa do corpo de prova seco (g);

m_u = é a massa do corpo de prova saturado (g).

3.5. Análise de fases e microestrutural das misturas

3.5.1. 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.

3.5.2. Análise microestrutural

A análise da superfície de fratura e da microestrutura dos corpos de prova incorporados com resíduo de lama de cal, 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.

A microestrutura dos corpos de prova incorporados após 28 dias de cura, também foi analisada via microscopia eletrônica de varredura (MEV), com auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura SUPERSCAN SS-550, de fabricação SHIMADZU, com o objetivo de acompanhar as mudanças da microestrutura com a quantidade de resíduo incorporado. A análise da superfície de fratura das amostras foi feita após metalização com uma fina camada de ouro.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento experimental da presente tese.

4.1. Caracterização das matérias-primas

4.1.1. Caracterização mineralógica

4.1.1.a. Solo

Na Figura 4.1 é apresentado o difratograma de raios-X para o solo utilizado neste trabalho.

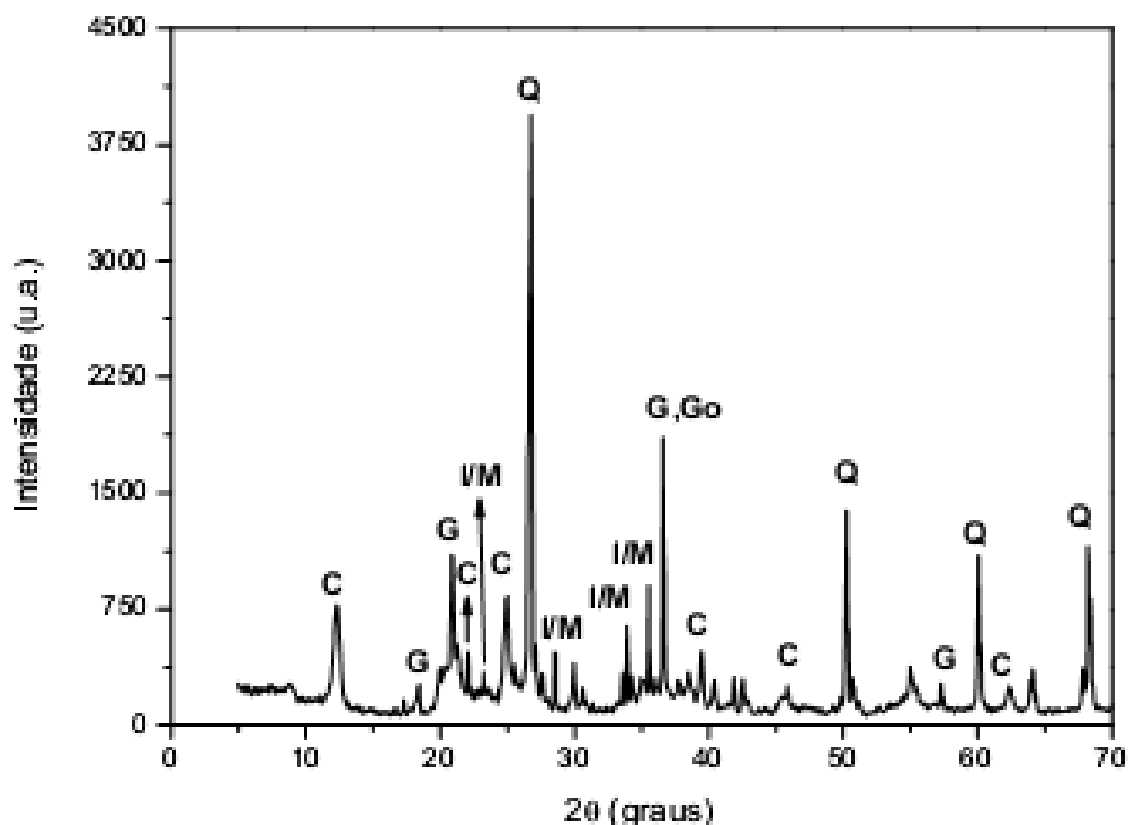


Figura 4.1. Difratograma de raios-X do solo: C - Caulinita; G - Gibsitita; Go - Goetita; I/M - Ilita/Mica; Q - Quartzo.

Pode ser observado que o solo apresenta picos característicos predominantes de caulinita, gibsitita, ilita/mica, quartzo, e goetita.

O quartzo (SiO_2), ou sílica livre, é um mineral encontrado nas argilas e solos, contribui com a redução da plasticidade do material, sua elevada concentração no solo utilizado é uma característica atrativa para sua aplicação em tijolos solo-cimento. Isto se deve ao fato do quartzo ser uma partícula dura que contribui para o aumento da resistência da mistura solo-cimento e também por ser um material inerte, ou seja, ele não reage com o cimento liberando uma quantidade maior de cimento para as outras partículas do solo serem estabilizadas. Quanto maior a quantidade de quartzo mais arenoso é o solo.

A caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) é constituída basicamente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) o que confere a refratariabilidade ao solo, e também é o argilomineral principal constituinte do solo e característico das argilas vermelhas da região de Campos dos Goytacazes (VIEIRA *et al.*, 2001).

A ilita/mica representam minerais ricos em óxidos fundentes, que são responsáveis por gerar a fase líquida na sinterização. As micas são as principais fontes de potássio do solo. Quando a mica é hidratada ou empobrecida em potássio ela se transforma em ilita (SIQUEIRA, 2013).

A gibsitita ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$) é um dos óxidos de alumínio mais comum encontrado nos solos, contribui com o aumento da perda de massa durante a queima e com a refratariedade da peça (SIQUEIRA, 2013).

Os picos de goetita (FeOOH) revelam o teor de ferro presente no solo, já que é a forma mais estável dos óxidos de ferro em solos e contribui para coloração amarelada do solo (CURI *et al.*, 1984).

Na Figura 4.2 é apresentada a curva de análise térmica diferencial (ATD) e a curva de análise termogravimétrica (ATG) do solo empregado.

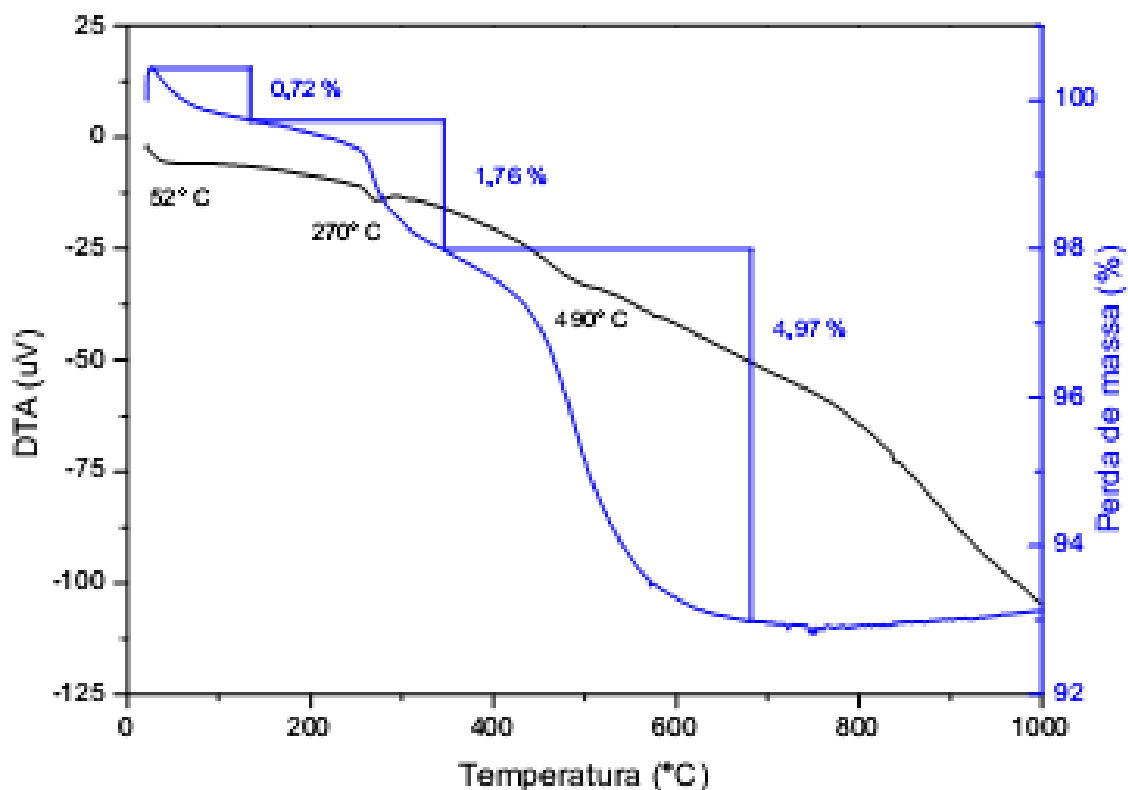


Figura 4.2. Curvas de análises térmicas diferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG) do solo utilizado.

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 gibsita e goetita, 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.

4.1.1.b. Cimento

A Figura 4.3 apresenta o difratograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS utilizado neste trabalho.

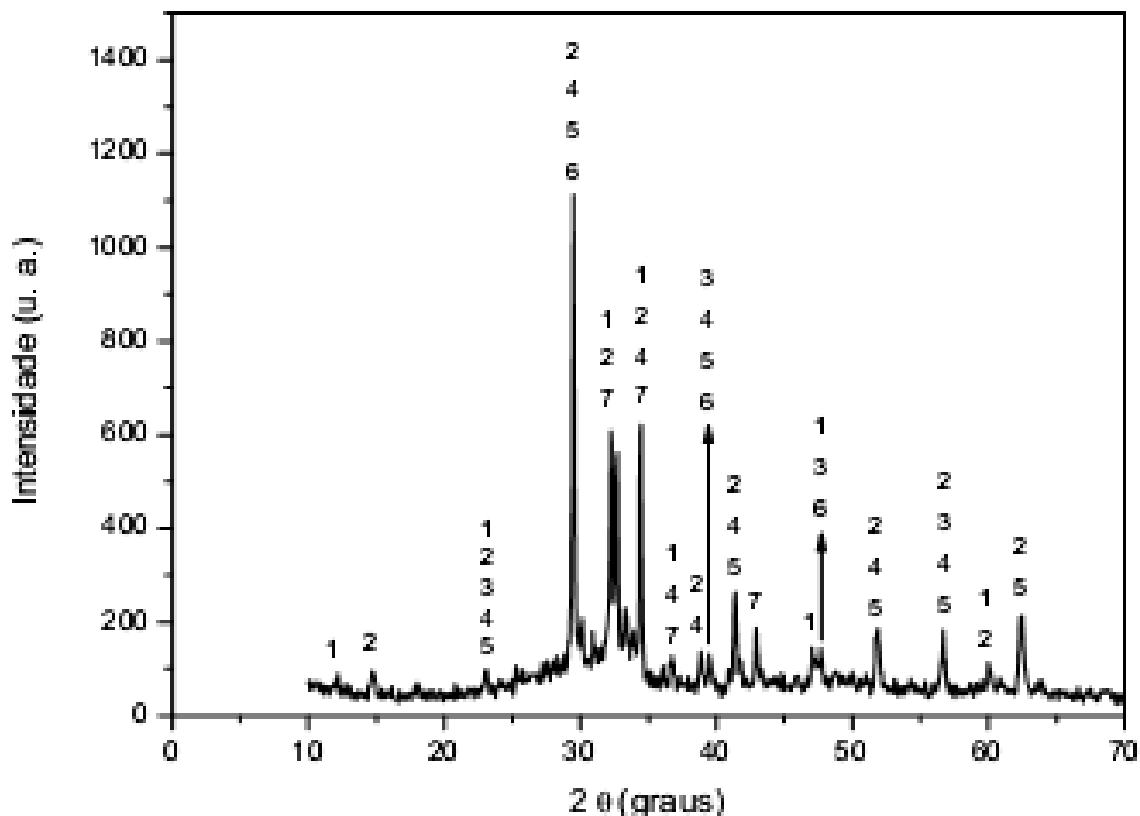


Figura 4.3. Difratograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS utilizado no trabalho: 1 - Ferroaluminato tetracálcio (C_4AF); 2 – Alita (C_3S); 3 - Carbonato de cálcio; 4 - Belita (C_2S); 5 - Aluminatotricálcio (C_3A); 6 - Óxido de cálcio; 7 - Gipsita ($CaSO_4$).

As fases identificadas foram: alita (silicato tricálcico - $3CaO.SiO_2$), belita (silicato dicálcio - $2CaO.SiO_2$), ferroaluminato tetracálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$), aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$) e gesso (sulfato de cálcio hidratado - $CaSO_4.2H_2O$). 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 após sofrerem hidratação (NEVILLE, 1997).

4.1.1.c. Resíduo de lama de cal

A Figura 4.4 apresenta o difratograma de raios-X do resíduo de lama de cal utilizado neste trabalho. As fases identificadas foram: calcita (CaCO_3) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2).

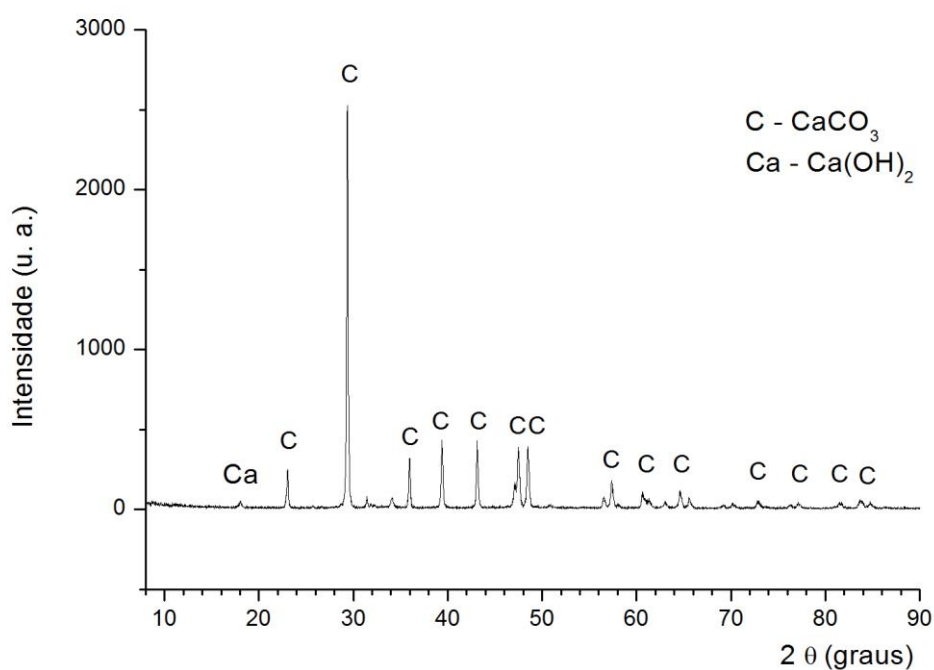


Figura 4.4. Difratograma de raios-X do resíduo de lama de cal utilizado no trabalho: C – calcita (CaCO_3); Ca – hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2).

Na Figura 4.5 é apresentado o padrão da calcita pura (mineral CaCO_3).

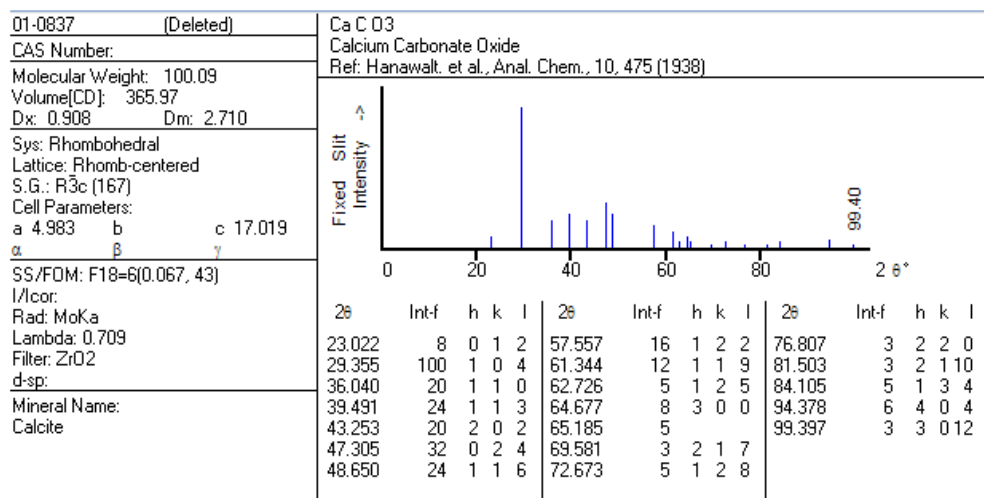


Figura 4.5. Ficha JCPDS da Calcita n° 01 – 0837.

Quando as duas figuras são comparadas, são observadas coincidências nos valores onde ocorrem os picos, comprovando então que em relação à mineralogia, o resíduo de lama de cal é predominantemente carbonato de cálcio (CaCO_3), que é o componente encontrado em maior proporção na formulação do cimento. E que em termos de mineralogia ele pode ser utilizado como fonte alternativa de carbonato de cálcio.

4.1.2. Caracterização química

4.1.2.a. Solo

A Tabela 4.1 mostra a composição química do solo usado neste trabalho.

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

Pode ser observado que o solo é constituído basicamente de óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃) com cerca de 75,33%. Essa alta quantidade de dióxido de silício sugere a presença de silicatos, micas e os feldspatos, e sílica livre, quartzo (MÁS, 2002). O óxido de alumínio está em sua maior parte combinada, formando os argilominerais (SANTOS, 1975). O solo contém também cerca de 7,40% de óxido de ferro (Fe₂O₃), indicativo da goetita, que é responsável pela cor amarelada do solo, contribui para redução da plasticidade e da variação dimensional (BITENCOURT, 2004).

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.

4.1.2.b. Cimento

A Tabela 4.2 mostra a composição química do cimento utilizado neste trabalho.

Tabela 4.2. Composição química do cimento CP III-40RS utilizado.

Óxido	Teor (%)
CaO	65,15
SiO ₂	18,87
Al ₂ O ₃	7,11
SO ₃	3,71
Fe ₂ O ₃	1,21
K ₂ O	0,56
TiO ₂	0,53
MnO	0,30
SrO	0,06
PF (1000 °C)	2,50

PF = perda ao fogo

Pode ser notado 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).

4.1.2.c. Resíduo de lama de cal

A Tabela 4.3 mostra a composição química do resíduo de lama de cal utilizado neste trabalho.

Tabela 4.3. Composição química do resíduo de lama de cal utilizado.

Óxido	Teor (%)
CaO	97,52
SiO ₂	1,33
SO ₃	0,75
SrO	0,22
Fe ₂ O ₃	0,18
ZrO ₂	0,01
PF (1000 °C)	35,67

PF = perda ao fogo

Pode ser verificado que o resíduo é constituído basicamente de óxido de cálcio (CaO) com 97,52% em peso, seguido por pequenas quantidades de óxido de silício (SiO₂) e óxido de enxofre (SO₃). O alto percentual de óxido de cálcio se deve, fundamentalmente, a presença de carbonato de cálcio (CaCO₃).

A perda ao fogo é relativamente alta da ordem de 35,67%, a qual está relacionada, principalmente, a volatilização do gás carbônico (CO₂) devido à decomposição de carbonato de cálcio em temperaturas elevadas, conforme equação 2.1.

Avaliando a composição química do resíduo e os parâmetros estabelecidos na ABNT NBR 12653 (2012) – Materiais pozolânicos, é visto que a soma dos percentuais de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ estão muito abaixo do valor mínimo de 70% exigido pela norma e ainda, a perda ao fogo do resíduo foi relativamente alta, acima do valor máximo de 10,0% permitido, sendo um indicativo de que este resíduo não atua como pozolana.

Quando é feita uma comparação com os outros resíduos de lama de cal encontrados na literatura (Tabela 2.4), pode ser verificado que o resíduo de lama de cal utilizado é muito mais rico em óxido de cálcio, isto pode estar ligado ao processo de fabricação da empresa e sua eficiência.

A presença de anidro sulfúrico (SO₃), mesmo em pequenas proporções, pode ajudar a retardar tempo de pega do cimento, contribuindo assim com o ganho de tempo para manusear mistura de solo-cimento para fabricação do produto final.

Em comparação com os outros resíduos encontrados na literatura, a perda ao fogo é um pouco menor, na faixa de 5%, o que pode ser um atrativo para aplicação deste resíduo na fabricação de tijolos sinterizados ou revestimento cerâmico do tipo de semi gres. Porque durante a queima haverá menor quantidade de evolução de gás e conseqüentemente menor porosidade do produto final.

É importante notar que não foi verificada a presença de sódio na composição química deste resíduo o que o torna atrativo para aplicação como corretor de acidez do solo (CORRÊA et al, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2007, SIMONETE *et al.*, 2013).

4.1.3. Caracterização física

4.1.3.a. Solo

A Figura 4.6 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas do solo, obtida via análise combinada de sedimentação e peneiramento.

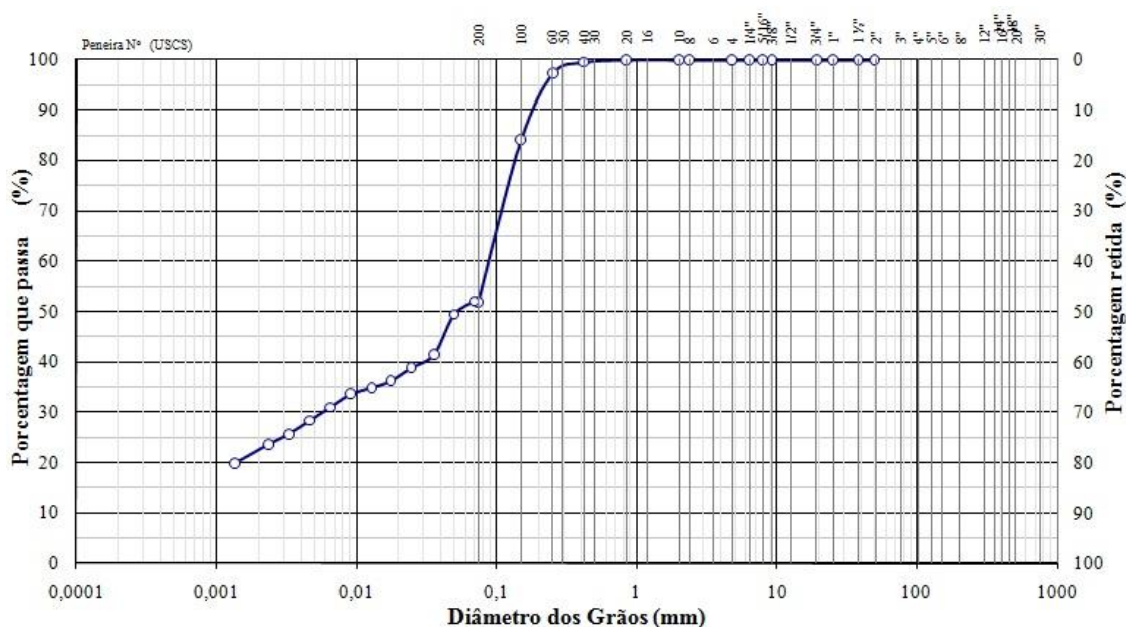


Figura 4.6. Curva granulométrica do solo utilizado.

Verifica-se que o solo utilizado possui cerca de 48% da fração areia (> 75 µm), 29% da fração silte (2 – 75 µm) e 23% da fração argila (< 2 µm). Isto

demonstra que o solo utilizado é predominantemente arenoso e que pode conter partículas de quartzo, comumente encontrada na faixa granulométrica areia e seguido também pelas micas (SILVA e FERREIRA, 2008). Na fração argila são comumente encontrados os óxidos de ferro, sendo o mais comum a goetita, por ser o mais estável. E também os filossilicatos: micas, caulinita, illita e outros não identificados neste solo (esmectita, vermiculita e a clorita).

Essa distribuição granulométrica confere maior densidade a mistura de solo-cimento devido a melhor acomodação das partículas, o que contribui com o aumento da resistência mecânica e diminuição da absorção de água (SUPERTOR, 198-).

Pode ser verificado que o tamanho médio das partículas do solo é da ordem de 50 μm .

Na Tabela 4.4 é apresentada a distribuição granulométrica do solo utilizado e as sugeridas pelo CEPED (1999) e ABCP (2002) para fabricação de tijolos solo-cimento.

Tabela 4.4. Classificação granulométrica do solo e as recomendadas pelo CEPED (1999) e ABCP (2002).

Classificação granulométrica	Solo utilizado (%)	CEPED (1999) (%)	ABCP (2002) (%)
Argila (< 2 μm)	23	< 20	10 – 20
Silte (2 – 63 μm)	29	-	10 – 20
Silte+Argila (< 63 μm)	52	10 - 55	-
Areia (> 63 μm)	48	45 - 90	50 - 70

Pode ser visto que a distribuição granulométrica do solo utilizado está bem próxima da recomendada indicando que este pode ser utilizado para fabricação de tijolos solo-cimento. E ainda existe a possibilidade de corrigir a granulometria com adição de areia para que seja obtida melhores propriedades do produto final e vantagens econômicas, como redução da quantidade de cimento (SILVA, 2005).

A massa específica real dos grãos da amostra de solo determinada via picnometria foi de 2,72 g/cm³. Este valor reflete os minerais que estão presentes neste solo. Na Tabela 4.5 é apresentada uma tabela com os minerais presentes no solo utilizado e suas respectivas densidades.

Tabela 4. 5. - Massa específica real dos grãos de alguns minerais (SIQUEIRA, 2013).

Mineral	Densidade (g/cm ³)
Quartzo	2,65 – 2,67
Caulinita	2,61 – 2,66
Ilita	2,60 – 2,86
Mulita	3,10 – 3,20
Gibsita	2,40 – 2,44
Goetita	3,3 – 4,3
Solo utilizado	2,72

A Tabela 4.6 apresenta os limites de consistência do solo utilizado e os recomendados pela ABCP (1985) e pelo CEPED (1999) para fabricação de tijolos solo-cimento.

Tabela 4.6. Limites de consistência do solo arenoso e os recomendados pela ABCP (1985) e pelo CEPED (1999).

Propriedade	Solo utilizado (%)	ABCP (1985) (%)	CEPED (1999) (%)
Limite de Liquidez	27,9	≤45,0	≤45,0
Limite de Plasticidade	18,4	-	-
Índice de Plasticidade	9,5	≤18,0	-

Pode ser visto que os limites de liquidez (LL) e o índice de plasticidade do solo (IP) estão dentro da faixa recomendada pela ABCP (1985) e pelo CEPED (1999) para a fabricação de tijolo solo-cimento.

O índice de plasticidade do solo utilizado é bem menor que o recomendado pela ABCP (1985) o que o torna atraente para aplicação em uma

mistura solo-cimento porque quanto menor este índice, maior é a facilidade dele de ser estabilizado, podendo ser reduzida quantidade de cimento empregada, pois o material estará menos sujeito a variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo pela absorção de água (SIQUEIRA, 2013).

4.1.3.b. Resíduo de lama de cal

A análise granulométrica do resíduo de lama de cal é mostrada na Figura 4.7.

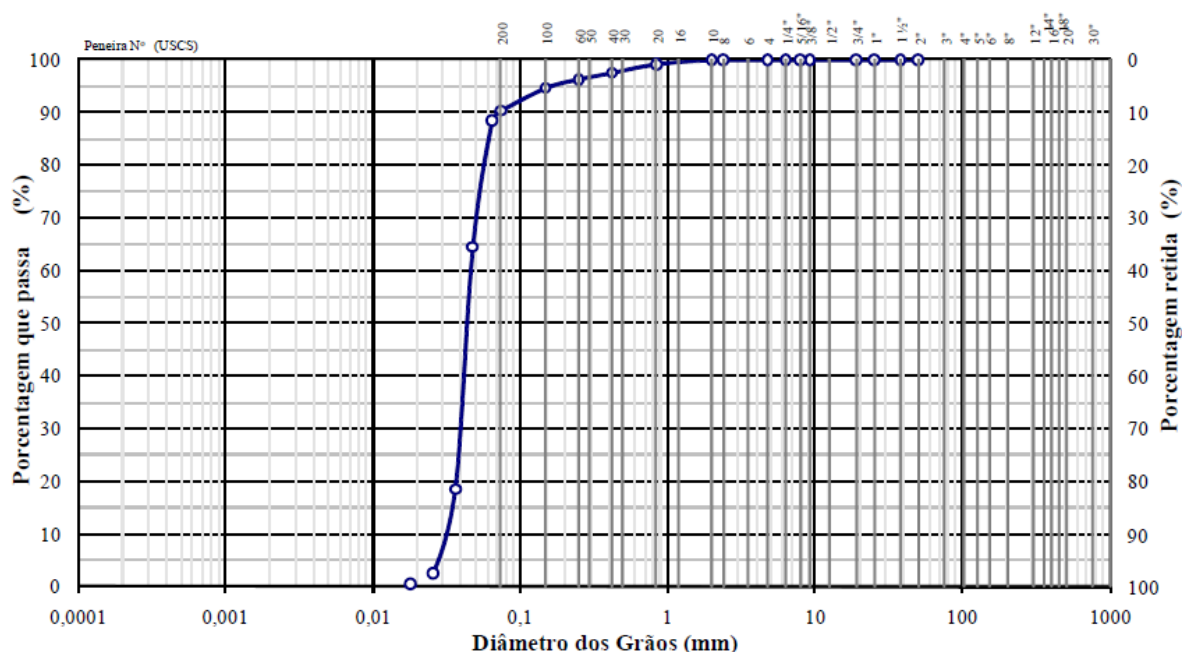


Figura 4.7. Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de lama de cal utilizado.

Pode ser visto que o resíduo é constituído basicamente da fração silte (2 – 75 μm) com 82,0% e fração areia (> 75 μm) da ordem de 18,0%. Isto mostra que o material de resíduo apresenta um alto percentual de partículas finas, que podem atuar como fíler diminuindo a porosidade da mistura solo-cimento.

O tamanho médio das partículas do resíduo é da ordem de 45 μm .

O valor da massa específica real dos grãos obtido foi de 2,75 g/cm^3 , o qual reflete a sua composição mineralógica, constituída basicamente de calcita que possui massa específica de 2,71 g/cm^3 .

Na Tabela 4.7 é apresentada a distribuição granulométrica do resíduo utilizado e o de Wolff (2008).

Tabela 4.7. Classificação granulométrica do resíduo empregado e a descrita por Wolff (2008).

Classificação	Diâmetro da partícula (mm)	Resíduo utilizado (%)	Wolff (2008) (%)
Areia	Maior que 0,075	18	3
Silte	0,002 – 0,075	82	90
Argila	Inferior a 0,002	0	7

Nota-se que a granulometria dos dois resíduos são próximas, porém o resíduo empregado tem uma quantidade maior de partículas na fração areia o que pode contribuir para aumento densidade da mistura solo-cimento.

A Figura 4.8 apresenta micrografias do resíduo de cal utilizado obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

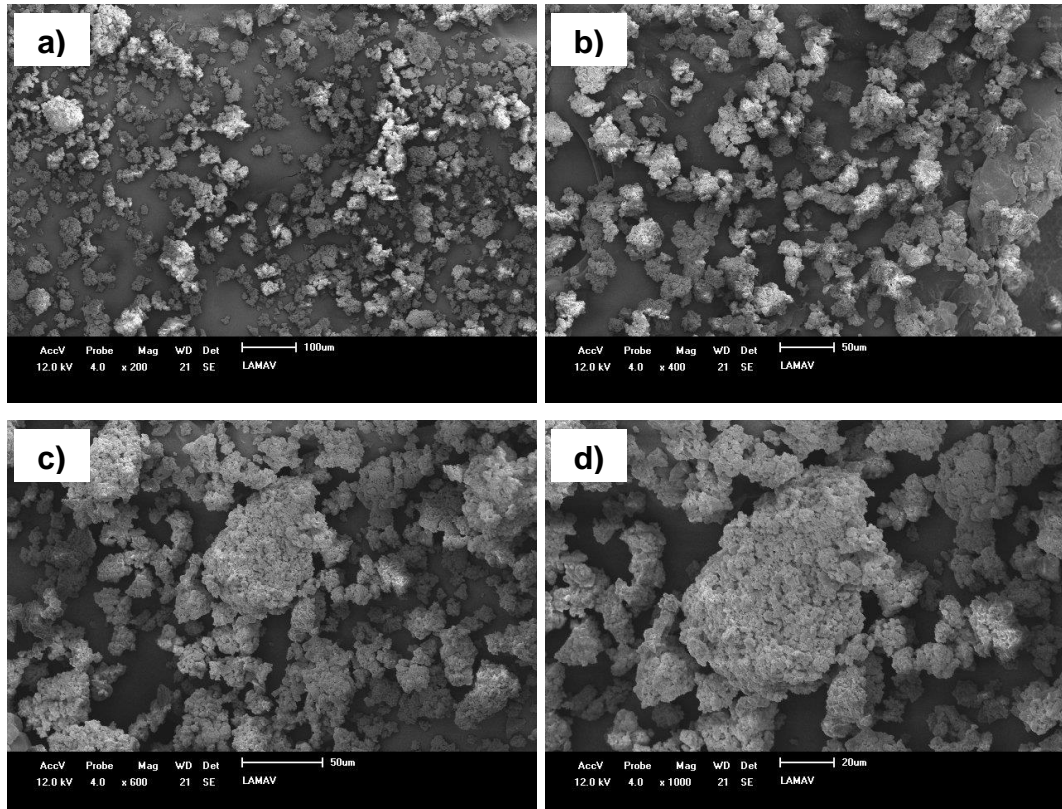


Figura 4.8. Microscopia eletrônica de varredura das partículas do resíduo de lama de cal: a) 200X; b) 400X; c) 600 C; e d) 1000X.

Verifica-se que as partículas apresentam uma morfologia irregular e uma textura rugosa (Figura 4. d), que pode contribuir para reações químicas devido ao aumento da área superficial. É notada também a que o tamanho das partículas observadas está de acordo com distribuição granulométrica (Figura 4.7).

4.1.4. Determinação da atividade pozolânica do resíduo de lama de cal

Na Tabela 4.8 é apresentada a classificação da atividade pozolânica e o índice de atividade do resíduo de lama de cal obtido utilizando o método de Luxan *et al.* (1989).

Tabela 4.8. Classificação da atividade pozolânica e o índice de atividade do resíduo de lama de cal obtido utilizando o método de Luxan *et al.* (1989).

Classificação	Índice de atividade pozolânica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Índice do resíduo de lama de cal ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Nenhuma	< 0,4	- 0,14
Moderada	0,4 – 1,2	-
Boa	> 1,2	-

Pode ser visto que o índice obtido classifica o resíduo como sem atividade pozolânica. Este resultado já era esperado porque o resíduo não atendeu os requisitos de composição química estabelecido pela ABNT NBR 12653 (2012).

4.2. Análise das propriedades das misturas preparadas

4.2.1. Massa específica aparente

Na Figura 4.9 é apresentado o comportamento da massa específica aparente média em função do teor de resíduo de lama de cal incorporado para

as misturas estudadas, antes da etapa de cura, após os 28 dias de cura e após secagem por 24h na estufa.

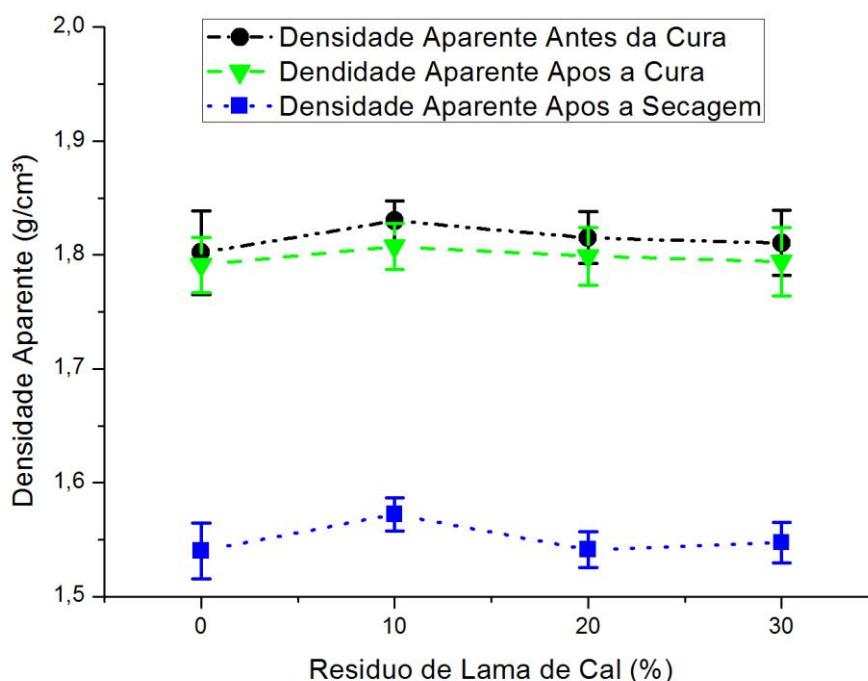


Figura 4.9. Massa específica aparente versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos antes da cura, após 28 dias de cura e após secagem.

Pode ser visto em ambas as curvas que a incorporação de resíduo na mistura teve uma influência pequena na densidade. E que os corpos de prova incorporados com 10% de resíduo apresentaram uma maior densidade.

Comparando as curvas antes (preta) e após a cura (verde), pode ser observado que a densidade dos corpos de prova é um pouco maior antes da cura. Porém a diferença entre as duas curvas é relativamente pequena, indicando que o processo de cura utilizado foi efetivo, porque não houve perda de água relevante nesta etapa, propiciando condições favoráveis para as reações de hidratação do cimento e consequente ganho de resistência da mistura. Esta pequena diferença entre as duas curvas revela que a variação volumétrica entre essas duas etapas também é pequena.

Quando é feita uma comparação entre as três curvas pode ser percebido que a curva após a secagem (azul) apresenta menor densidade, devido a perda de água durante o processo de secagem.

4.2.2. Variação dimensional

Na Figura 4.10 é apresentado o comportamento da variação dimensional média em função do teor de resíduo de lama de cal incorporado para as misturas estudadas.

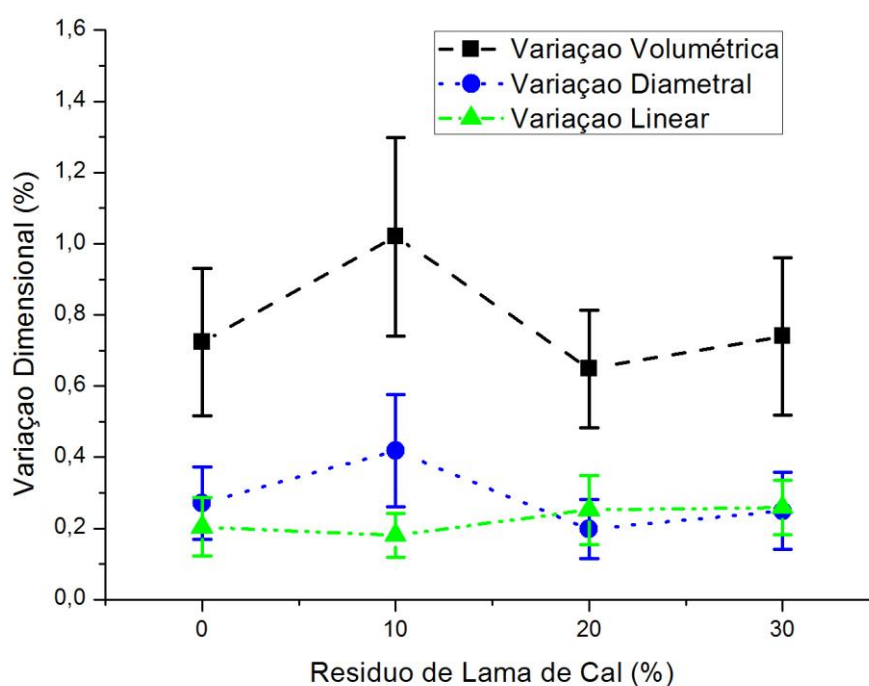


Figura 4.10. Variação dimensional versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos.

Pode ser visto que a incorporação de resíduo de lama de cal na mistura, de modo geral, influenciou pouco a variação volumétrica. A mistura com incorporação de resíduo de 10% de lama de cal apresentou maior variação em comparação com as outras, porém essa variação em relação às outras é bem pequena da ordem de 0,3%. Esta variação é resultado da variação diametral deste traço que também foi maior em relação aos outros estudados. Os traços

com 20% e 30% de resíduo apresentaram comportamento próximo ao do traço padrão.

Em relação à variação diametral, pode ser observado que a incorporação de 10% de resíduo de lama de cal na mistura aumentou a variação comparando com traço padrão, porém a incorporação de teores maiores diminuiu a variação diametral.

Já a variação linear foi a que teve um comportamento mais uniforme, variando suavemente com o aumento da incorporação do resíduo.

De uma forma geral, pode ser dito que as misturas estudadas apresentam boa estabilidade dimensional, sendo um atrativo para aplicação em tijolos solo-cimento.

4.2.3. Resistência à compressão

Na Figura 4.11 é apresentado o comportamento da resistência à compressão em função do teor de resíduo de lama de cal 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 (2,0 MPa) de acordo com a norma ABNT NBR 10834 (2012).

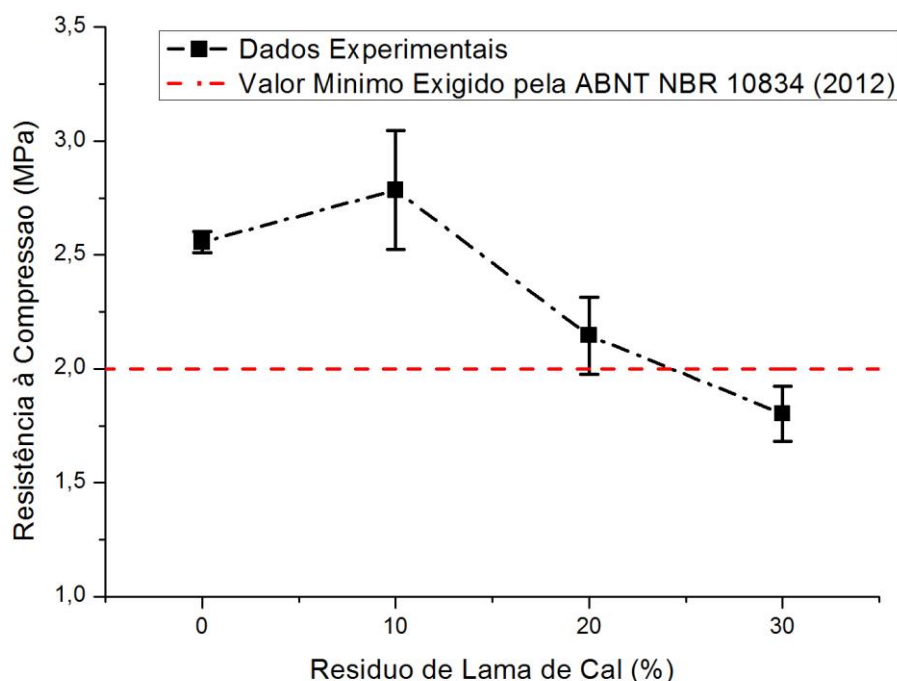


Figura 4.11. Resistência à compressão média versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.

Verifica-se que a resistência mecânica dos corpos de prova atinge valor máximo com a substituição de até 10% de cimento Portland por resíduo de lama de cal. Adições de resíduo acima de 10% tende a diminuir a resistência mecânica da mistura. Isto ocorre porque há redução da quantidade de cimento no traço, e é o cimento que promove o endurecimento da mistura. É observado também que o traço incorporado com 30% de resíduo tem resistência à compressão média inferior ao limite pela norma ABNT NBR 10834 (2012), não sendo recomendado o seu uso para fabricação de tijolos solo-cimento.

Na Figura 4.12 é apresentado os valores individuais de resistência à compressão obtidos em função do teor de resíduo de lama de cal para os corpos de provas ensaiados após os 28 dias de cura. Nesta figura é apresentado o valor mínimo de resistência à compressão individual (1,7 MPa) de acordo com a norma NBR 10834 (2012).

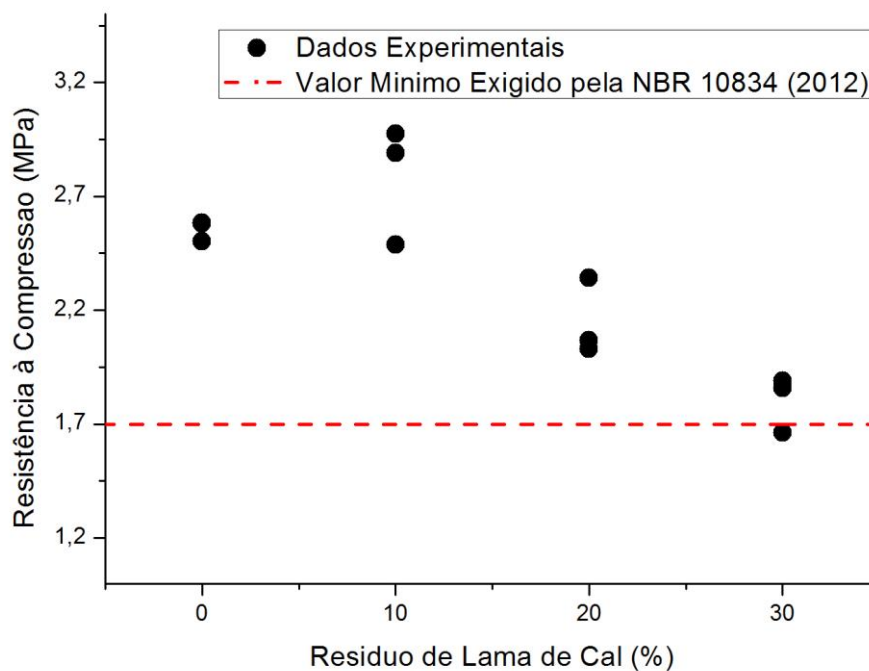


Figura 4.12. Valores de resistência à compressão individual versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura.

Na Figura 4.12 pode ser visto que apenas os corpos de prova incorporados com 30% de resíduo apresentaram resistência à compressão individual inferior a 1,7 MPa, que é o valor mínimo exigido pela NBR 10834 (2012). Isto significa que, em termos de resistência mecânica individual, este traço não deve ser usado na fabricação de tijolos solo-cimento.

4.2.4. 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 (20%) de acordo com a norma ABNT NBR 10834 (2012).

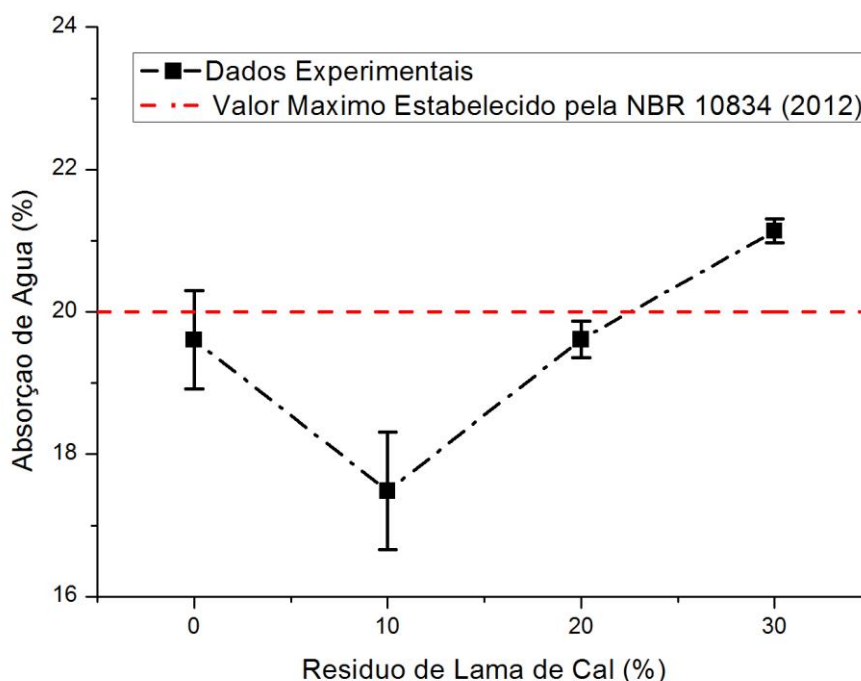


Figura 4.13. Absorção de água média versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.

Na Figura 4.13 pode ser observado que a incorporação de 10% de resíduo em substituição ao cimento promoveu uma redução da absorção de água em relação ao traço padrão. Pode ser notado também que a mistura com 20% de resíduo teve um comportamento praticamente similar ao traço de referência e que adições acima deste percentual provocaram um aumento da absorção de água. Este comportamento pode ser resultado da redução da porosidade aberta do material devido a atuação do resíduo como fíler, porém a partir de 20% de substituição do cimento a falta deste aglomerante começa a ser mais significativa do que o efeito de enchimento do resíduo.

O traço com 30% de resíduo apresentou absorção de água média acima do estabelecido pela ABNT NBR 10834 (2012), não sendo indicado para a fabricação de tijolos solo-cimento.

Na Figura 4.14 é apresentado um gráfico com os valores individuais de absorção de água obtidos em função do teor de resíduo para os corpos de provas ensaiados após os 28 dias de cura. Nesta figura é apresentado o valor

máximo de absorção de água individual (22%) de acordo com a norma ABNT NBR 10834 (2012).

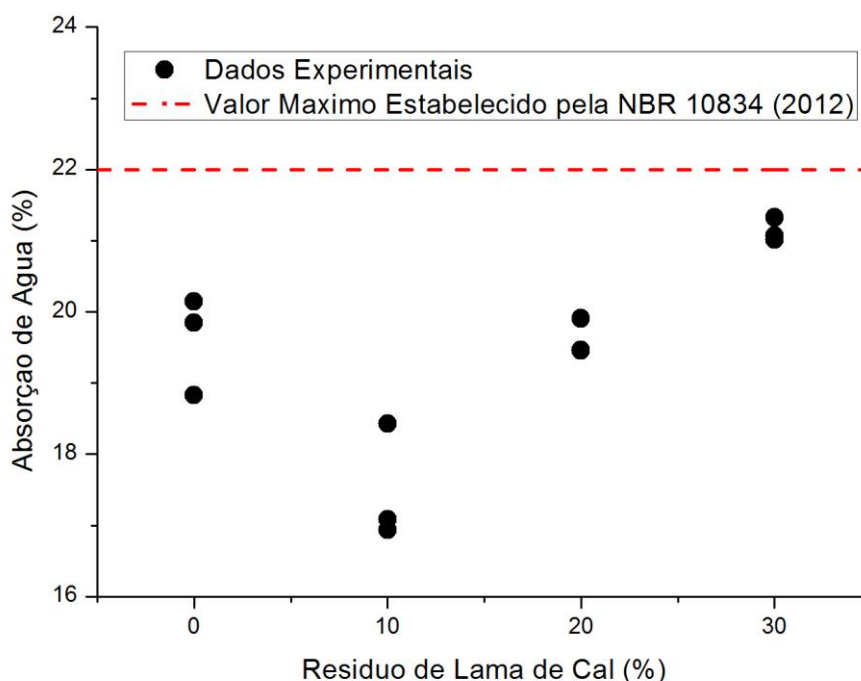


Figura 4.14. Valores de absorção de água individual obtidos no ensaio versus porcentagem de resíduo de lama de cal incorporada dos corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura.

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 ABNT NBR 10834 (2012).

4.3. Análise de fases e microestrutural das misturas preparadas

A Figura 4.15 apresenta os difratogramas de raios-X das misturas com incorporação de 0, 10, 20 e 30% de resíduo de lama de cal, após 28 dias de cura.

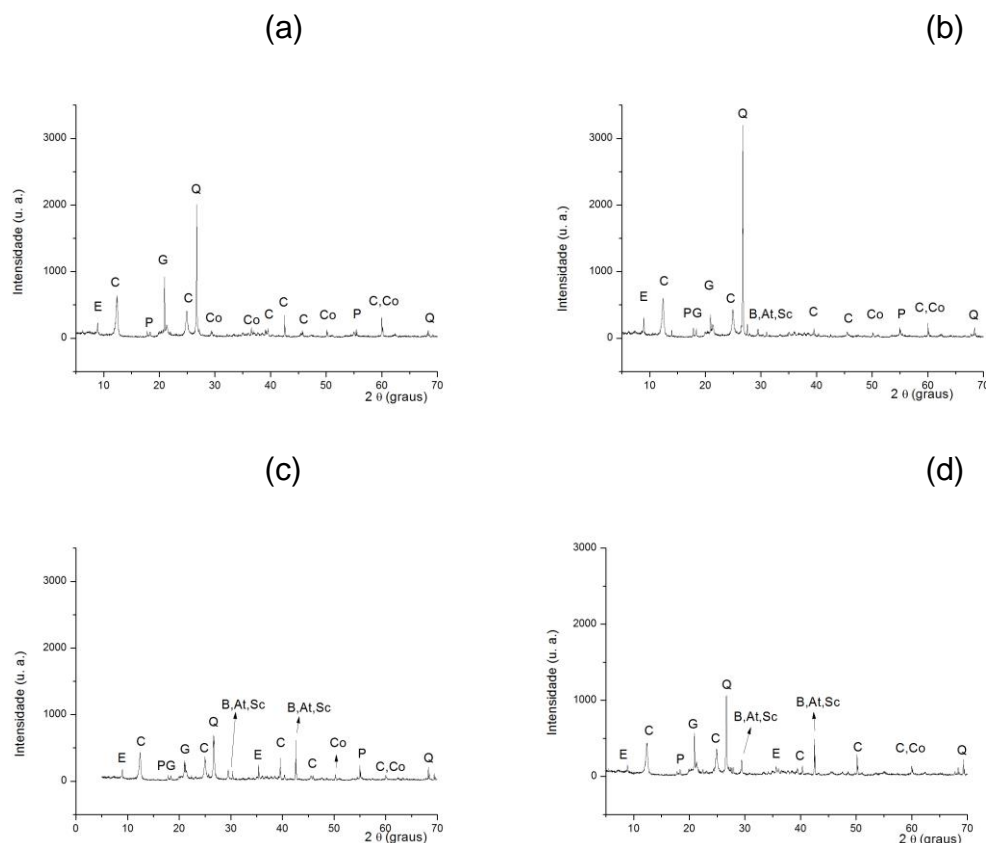


Figura 4.15. Difratoograma de raios-X das misturas incorporadas com: a) 0%; b) 10%; c) 20%; e c) 30% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: C = Caulinita; G = Gipsita; Q = Quartzo; B = Belita (C_2S); P = Portlandita (C-H); Sc = Silicato de cálcio hidratado (C-S-H); E = Etringita ($C_6AS_3H_{32}$); At = Aluminato tricálcio (C_3A); Co = calcita ($CaCO_3$).

A adição de apenas 10% de resíduo modificou a fase cristalina calcita dando lugar ao pico de Belita (C_2S), Silicato de cálcio hidratado (C-S-H), Aluminato tricálcio (C_3A). Já as fases quartzo e caulinita não foram influenciadas pela adição de resíduo. As fases etringita, portlandita (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) são decorrentes da hidratação das fases anidras do cimento durante o processo de cura (SIQUEIRA, 2013). Pode ser verificada também a presença de fases como aluminato tricálcio e belita que são componentes do cimento e não sofreram hidratação. Ainda, quando comparado os difratogramas de raios-X das misturas pode ser dito que, de uma maneira geral, a incorporação de resíduo de lama de cal não altera as fases cristalinas, sendo mais um indicativo que ela atua como enchimento da mistura sem participar das reações de hidratação do cimento.

4.4. Análise microestrutural

4.4.1. Microscopia confocal

A Figura 4.16 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 (SiO_2) 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.

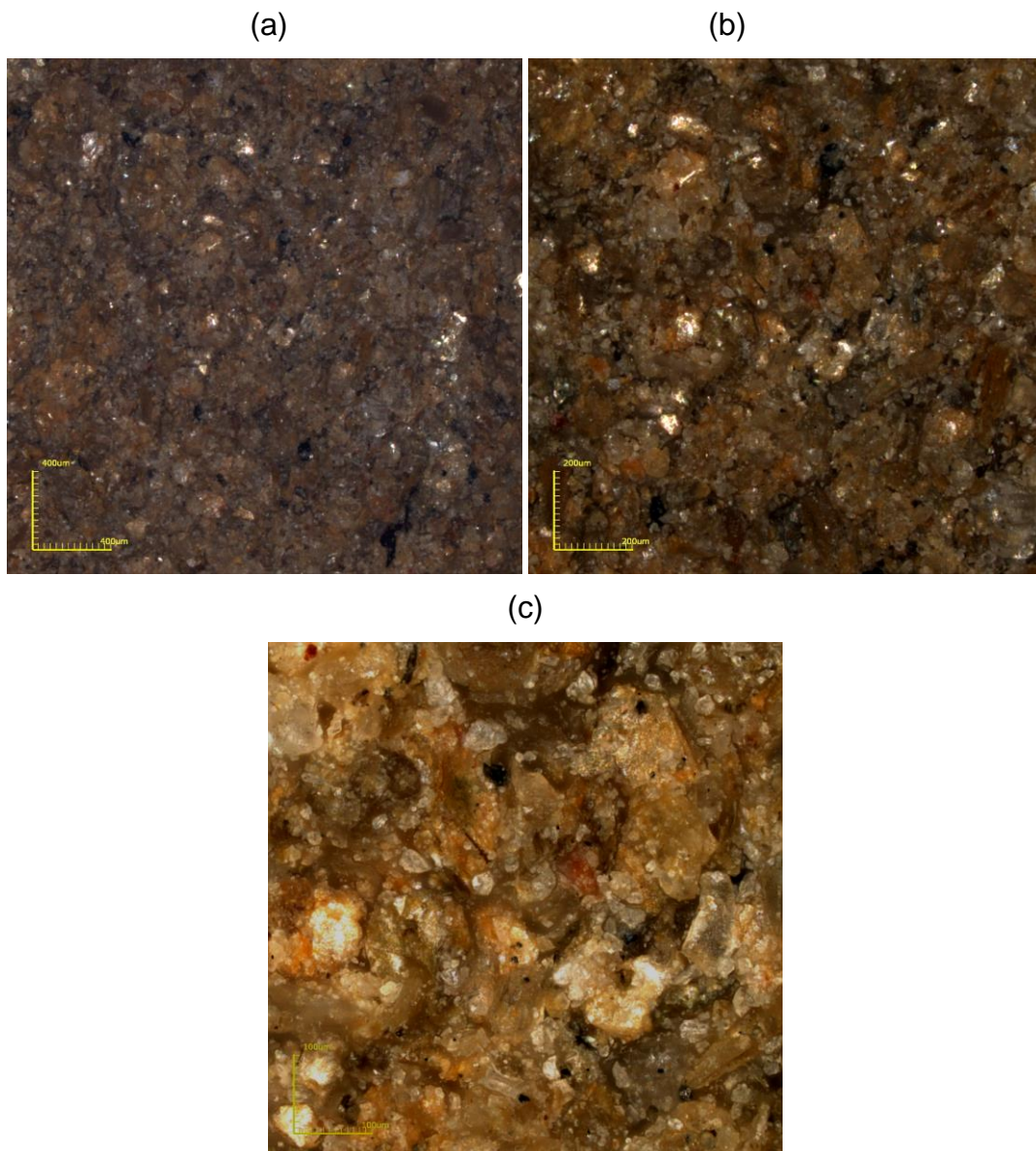


Figura 4.16. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 0% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.

A Figura 4.17 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por microscopia confocal do corpo de prova com incorporação de 10% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura.

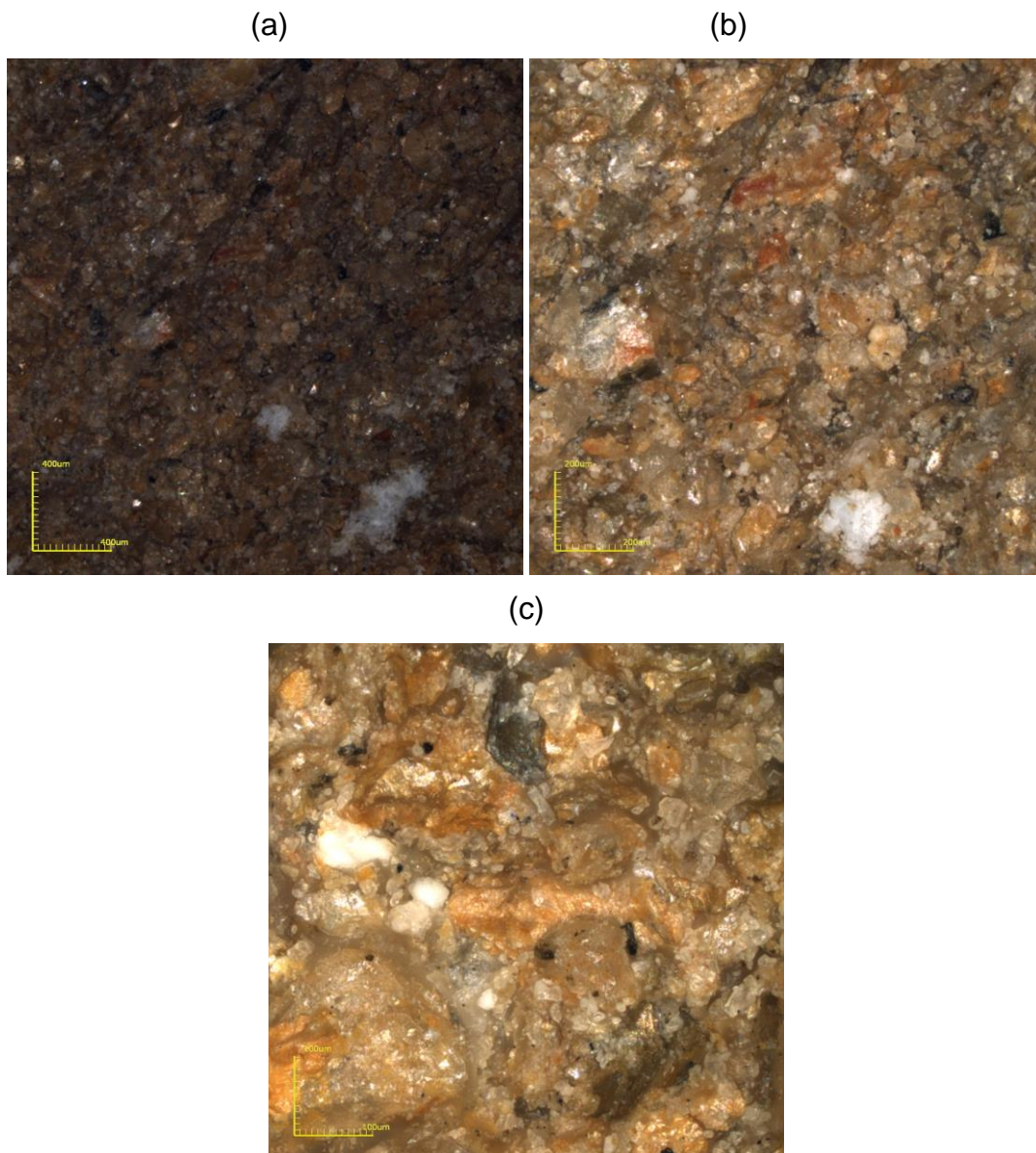


Figura 4.17. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 10% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x;(c) 430x.

Pode ser observado que a massa cimentícia incorporada com 10% de resíduo de lama de cal apresenta aglomerados do resíduo na região próxima 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 da massa é uniforme, proveniente uma homogeneização eficiente.

A Figura 4.18 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por microscopia confocal do corpo de prova com incorporação de 20% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura.

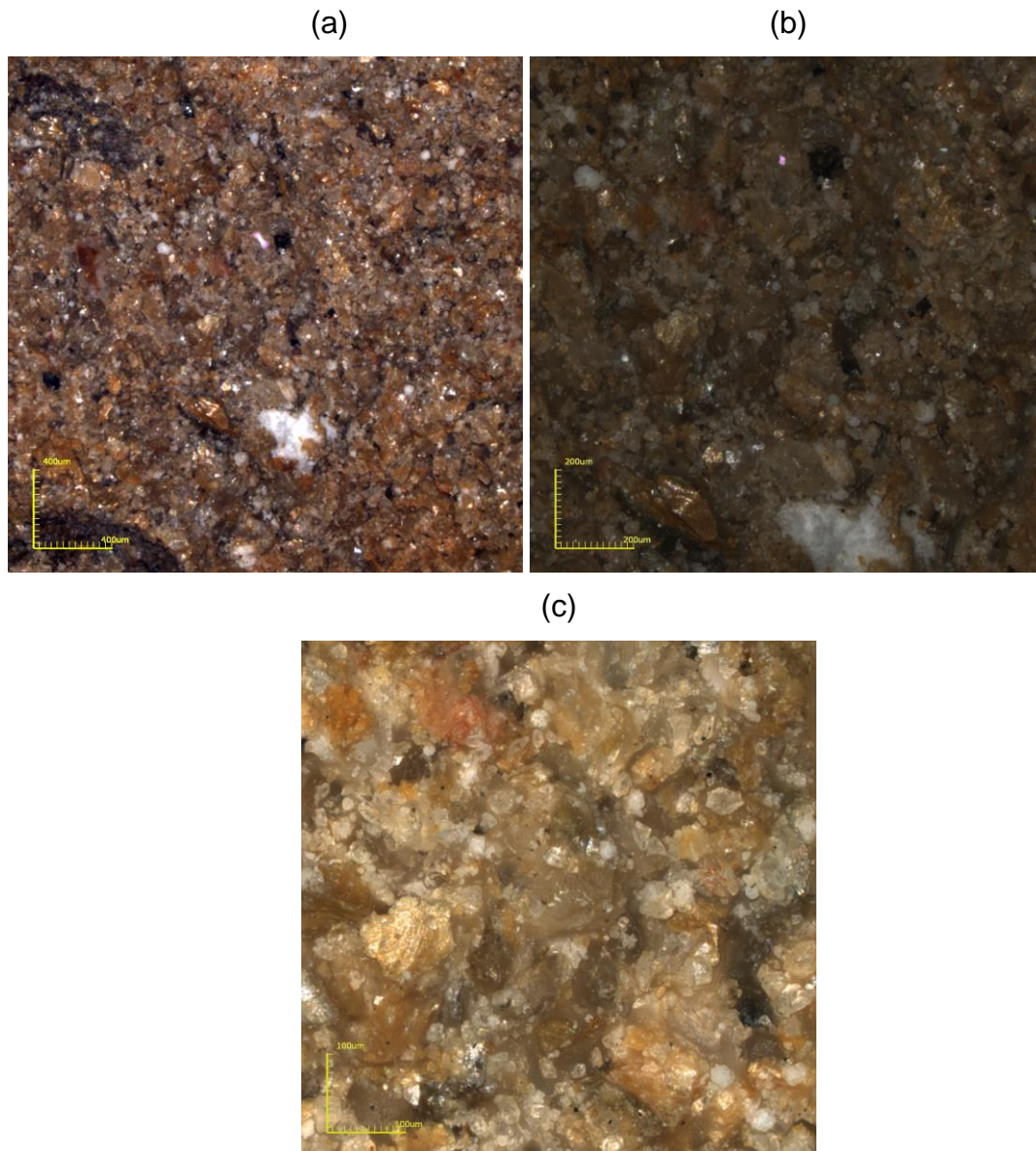


Figura 4.18. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 20% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x; (c) 430x.

A microestrutura tem um formato mais desagregado das partículas e com maior concentração de poros, o que reflete nas propriedades mecânicas. A homogeneização também foi efetiva nessa mistura.

A Figura 4.19 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por microscopia confocal do corpo de prova com incorporação de 30% de resíduo de lama de cal após 28 dias de cura.

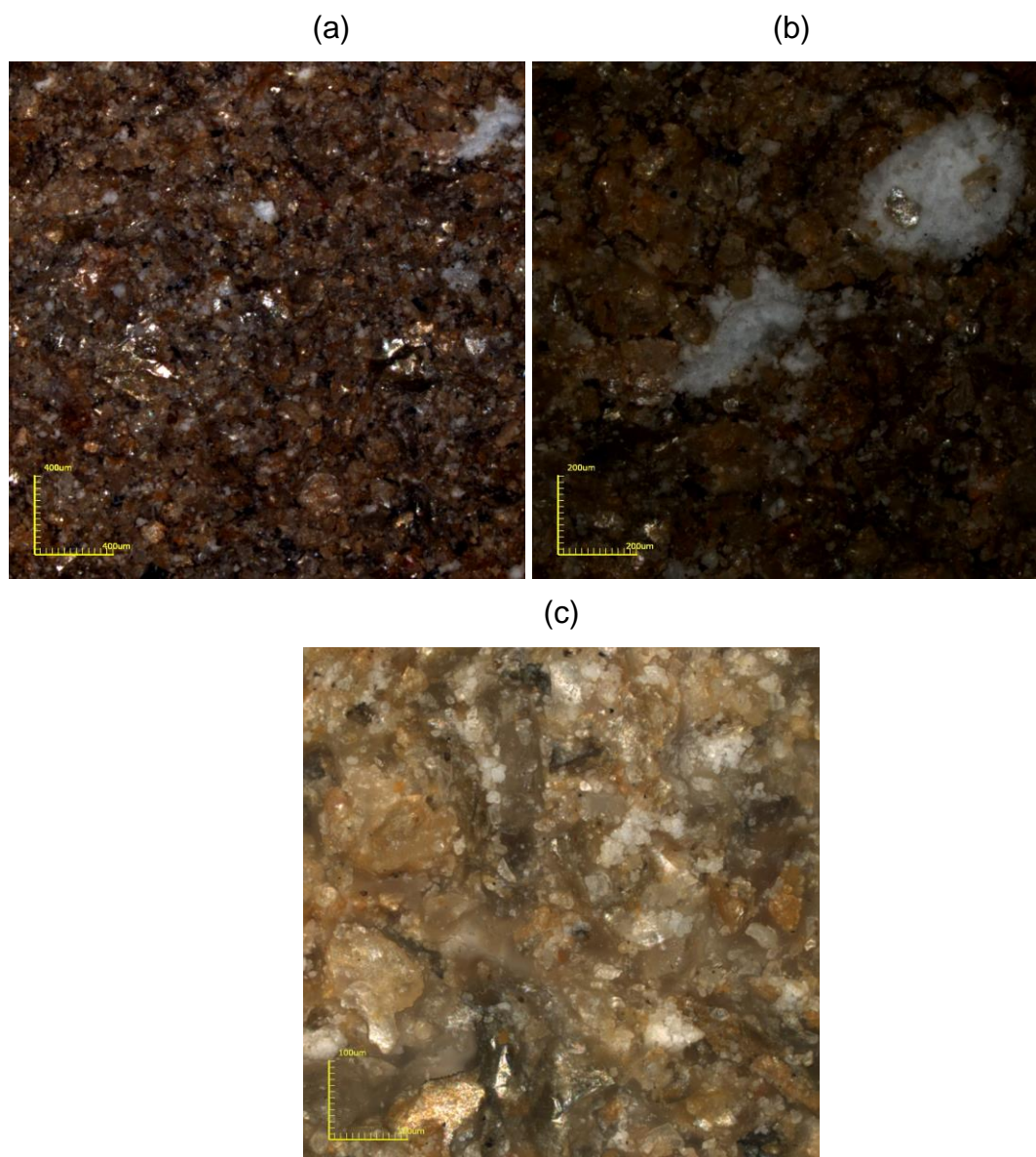


Figura 19. Microestrutura da superfície de fratura da mistura com 30% de resíduo de após 28 dias de cura: (a) 108x; (b) 216x; (c) 430x.

Pode ser observado que a massa cimentícia incorporada com 30% de resíduo apresenta uma coloração uniforme, indicando homogeneização eficiente. O resíduo encontra-se localizado em certos pontos na mistura, apresentando aglomerados. Pode ser verificado também que a quantidade de poros na mistura aumentou, refletindo na absorção de água.

Na Figura 4.20 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura, obtida por microscopia confocal dos quatro traços estudados.

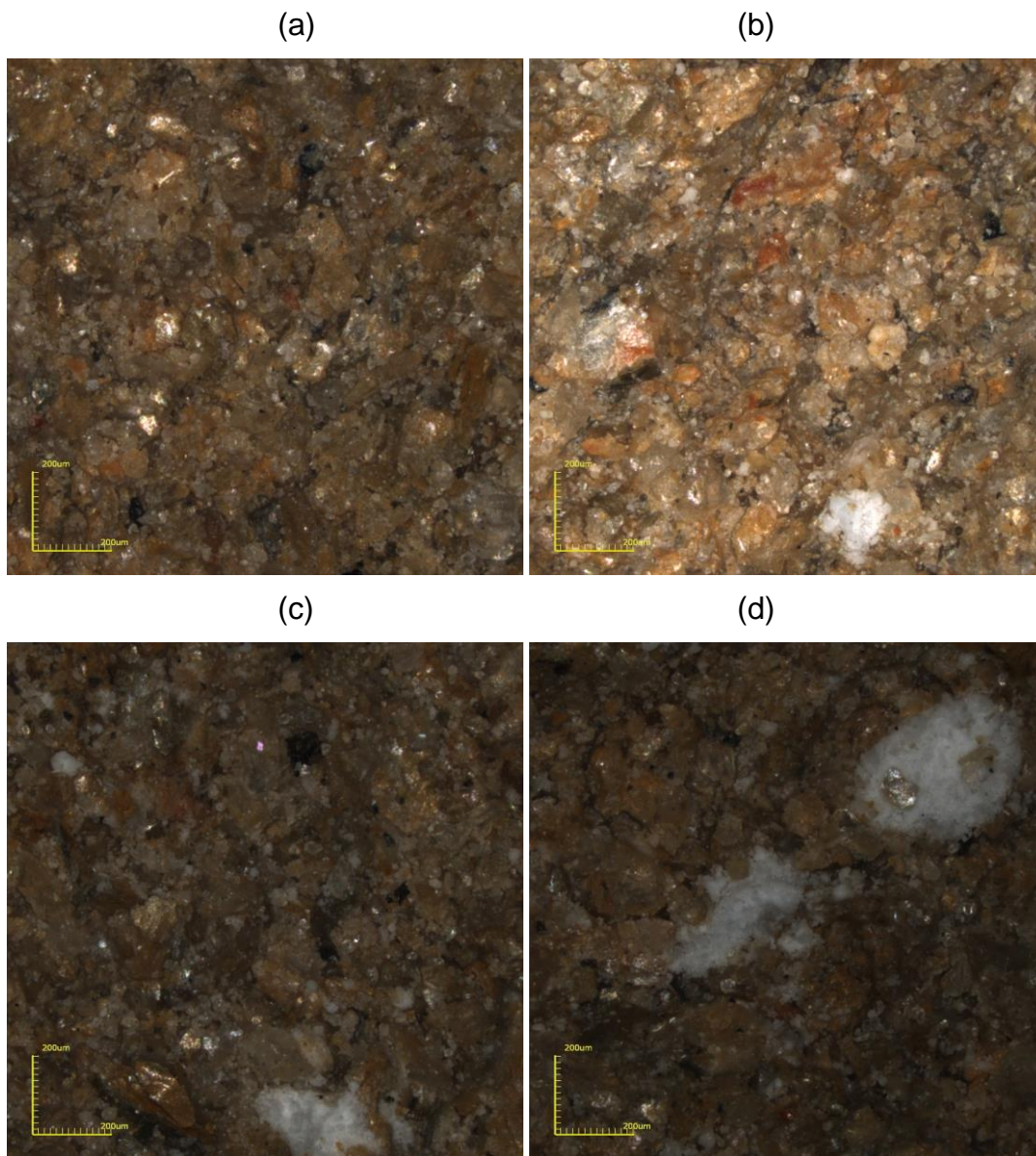


Figura 4.20. Microestrutura da superfície de fratura das misturas estudadas com aumento de 216x após 28 dias de cura: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30% de resíduo de lama de cal.

Pode ser notado que com o aumento da porcentagem do resíduo, foi observado aglomerados do resíduo e que a homogeneização de todas as massas foi efetiva.

4.4.2. Microscopia eletrônica de varredura

Primeiramente serão apresentadas as micrografias dos traços estudados em diversos aumentos e uma breve descrição de cada um. Por fim, será apresentado as micrografias dos traços estudados em um mesmo aumento para avaliar o efeito da adição do resíduo na microestrutura da mistura solo-cimento.

Na Figura 4.21 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do traço sem resíduo.

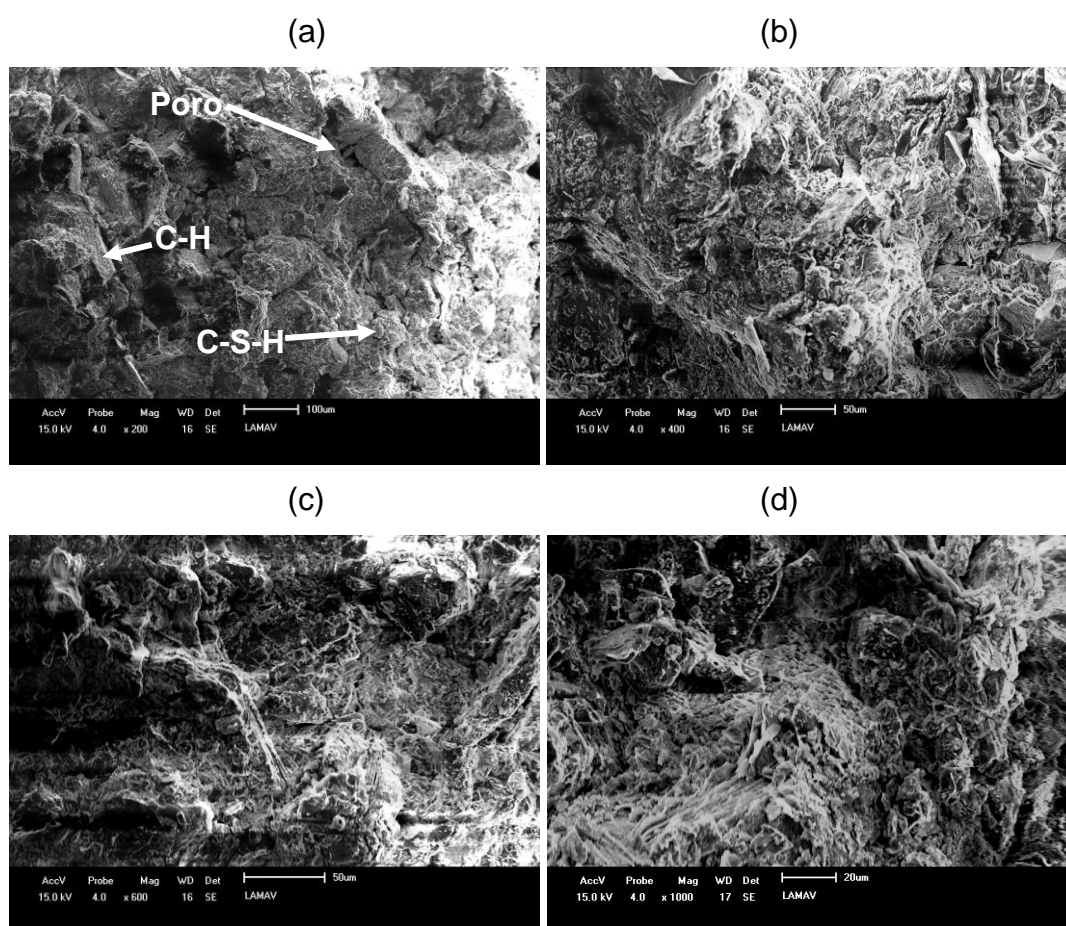


Figura 4.21. Microestrutura da superfície de fratura da mistura sem resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 600x e (d) 1000x.

Pode ser observada uma superfície de fratura irregular de aspecto lamelar da mistura. É verificada a presença de poros e trincas, mais evidente na Figura 4.21.a. Na seta indicada, pode ser visto um poro e a trinca se propagando ao longo da microestrutura, isto ocorre devido ao efeito de

concentração de tensão deste defeito. São observadas também a portlandita (C-H) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que são produtos da reação de hidratação do cimento, que promovem o endurecimento da mistura.

Na Figura 4.22 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura, obtida por MEV do traço incorporado com 10% de resíduo.

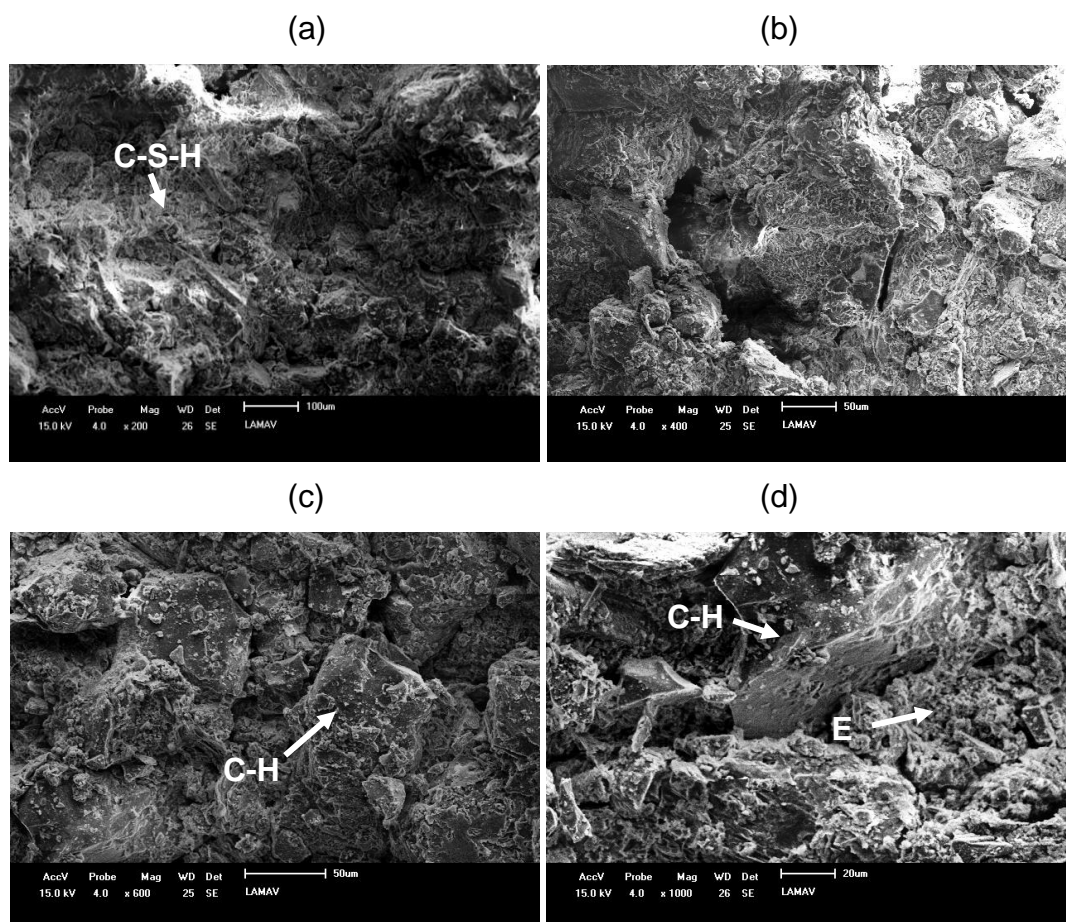


Figura 4.22. Microestrutura da superfície de fratura do traço com 10% de resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 600x e (d) 1000x.

A superfície de fratura da mistura se apresenta irregular e de aspecto lamelar. É verificada a presença de poros e trincas e são encontradas também as fases resultantes da reação de hidratação do cimento: a portlandita (C-H), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a etringita (E).

Na Figura 4.23 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura, obtida por MEV do traço incorporado com 20% de resíduo.

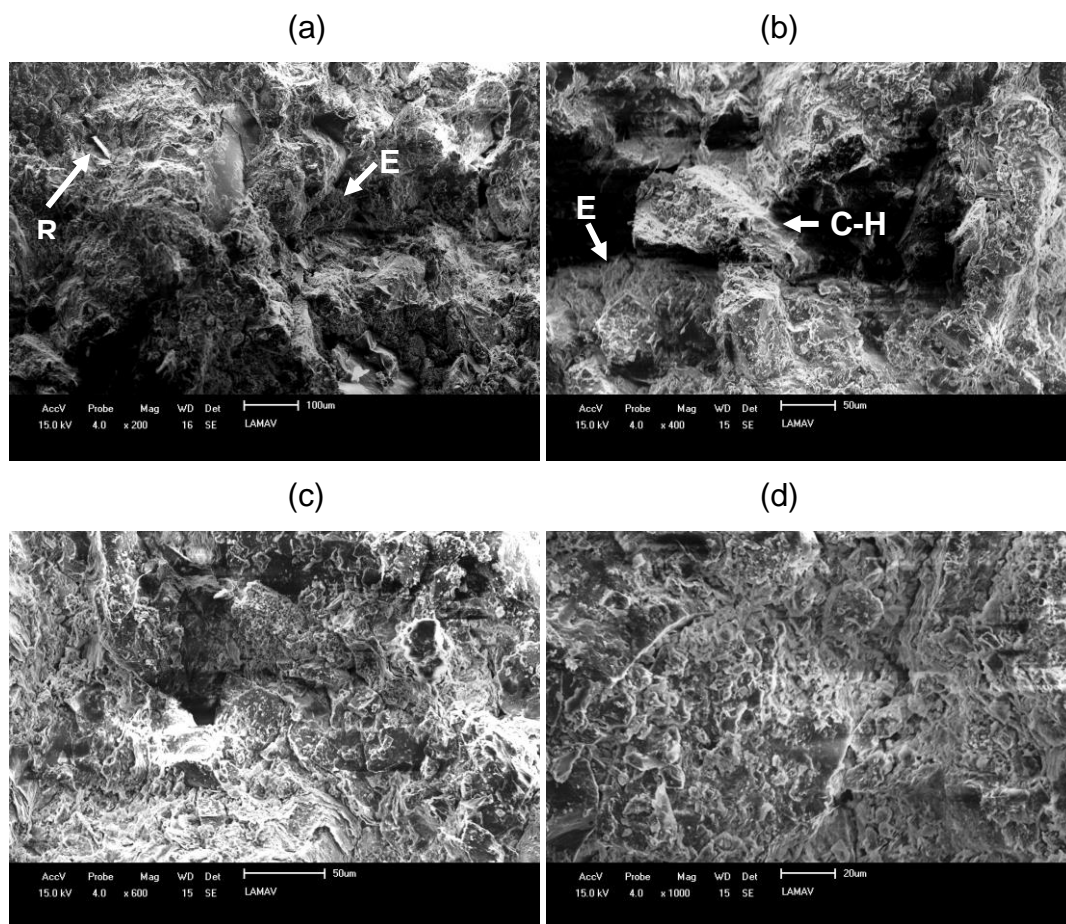


Figura 4.23. Microestrutura da superfície de fratura do traço com 20% de resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 600x e (d) 1000x.

Novamente é notada uma superfície de fratura irregular de aspecto lamelar da mistura. É verificada uma presença maior de poros e trincas, mais evidente na Figura 4.23.a. Pode ser visto uma partícula do resíduo (R), localizado adequadamente em um poro. São observadas predominantemente as fases portlandita (C-H) e a etringita (E).

Na Figura 4.24 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura, obtida por MEV do traço incorporado com 30% de resíduo.

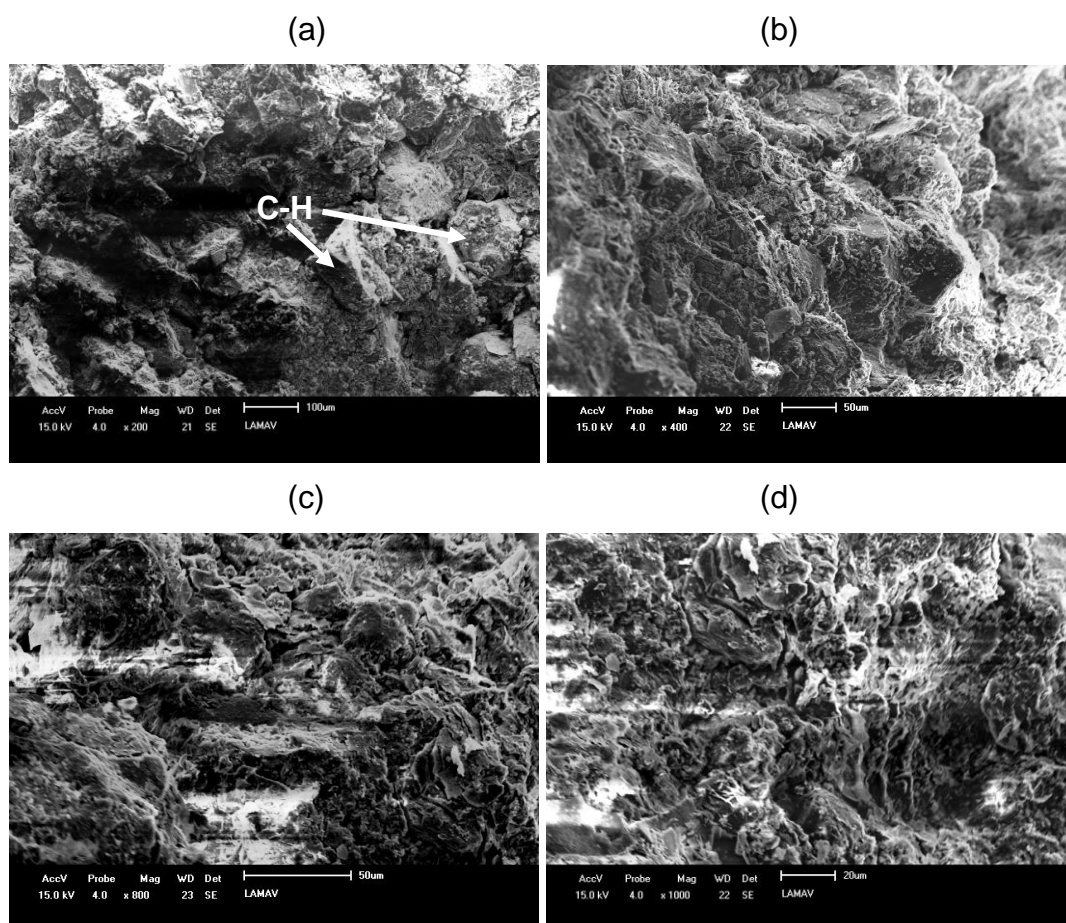


Figura 4.24. Microestrutura da superfície de fratura do traço com 30% de resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 400x; (c) 800x e (d) 1000x.

Verifica-se também uma superfície de fratura irregular de aspecto lamelar da mistura. É verificada uma grande quantidade de poros e trincas, mais evidente na Figura 4.24.a. A microestrutura predominante é a portlandita (C-H), que apesar de ser um produto de reação do cimento, forma uma interface descontínua com as outras partículas, o que diminui a resistência mecânica e aumenta a porosidade.

Na Figura 4.25 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura, obtida por MEV dos traços estudados neste trabalho com aumento de 200x.

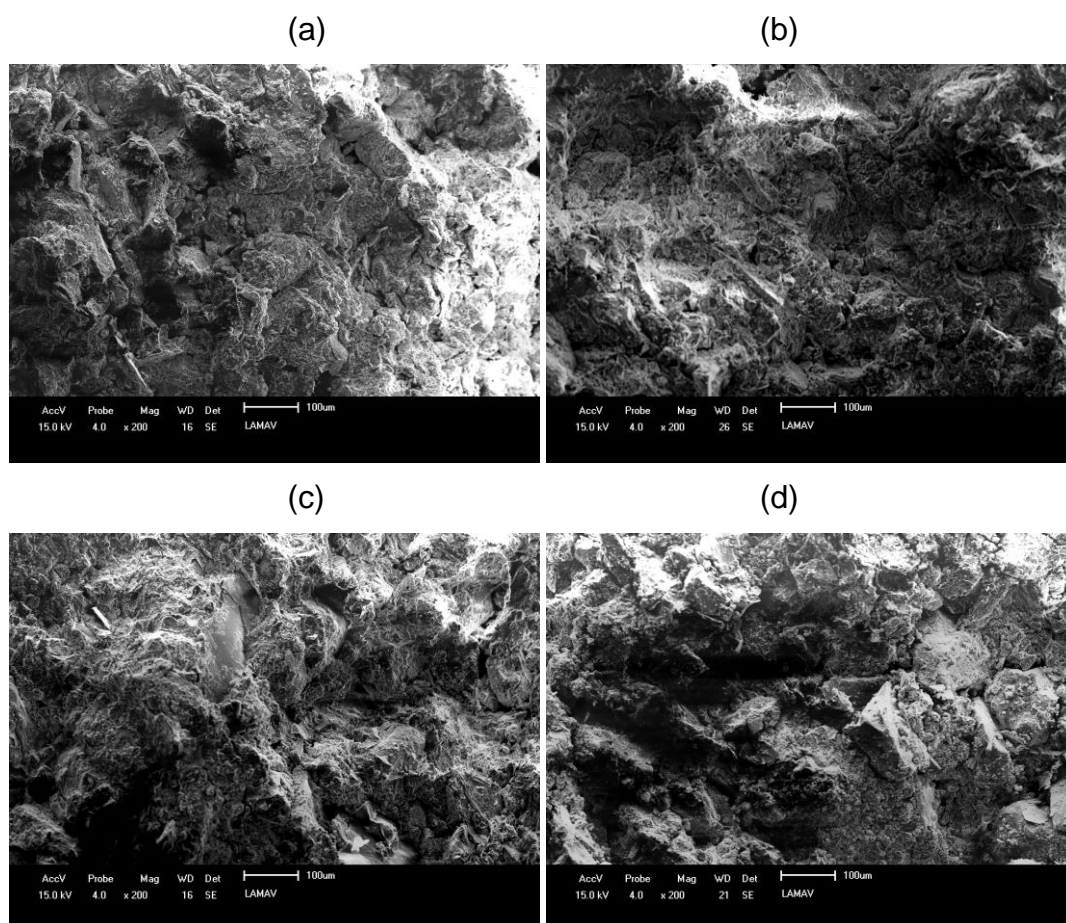


Figura 4.25. Microestrutura da superfície de fratura dos traços estudados após 28 dias de cura com aumento de 200x: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20% e (d) 30%.

Pode ser observado que a microestrutura do traço com 10% de resíduo se apresenta mais fechada, mais densa, com menor quantidade de poros e consequentemente de trincas, em relação aos outros traços estudados, o que pode ser resultado de uma maior densificação desta mistura, provocada pela adição do resíduo, o que deu origem a melhores propriedades finais, menor absorção de água e maior resistência mecânica. Outro fator que contribui para as melhores propriedades do traço com 10% de resíduo é a microestrutura ser formada predominantemente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), pois ele forma uma microestrutura mais contínua, que diminui a porosidade e contribui com o aumento da resistência mecânica devido a melhor distribuição de carga na sua interface quando solicitado.

Uma importante comparação deve ser feita em relação ao traço padrão e o traço com 20% de resíduo, já que estes apresentaram uma densidade bem próxima, absorção de água semelhante porém resistência mecânica diferente.

A microestrutura do traço padrão é C-S-H e C-H e a do traço com 20% é de C-H e com pouco de etringita. Pode ser dito desta forma que a densidade influenciou mais na propriedade de absorção de água e a resistência mecânica foi influenciada pela microestrutura. Porque o traço padrão devido a maior quantidade de cimento formou uma maior quantidade da fase C-S-H, que como dito anteriormente, é a mais responsável pelo endurecimento do cimento.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

5.1. Conclusões

A partir dos resultados experimentais obtidos neste trabalho de tese de Doutorado pode ser concluído que:

1. O solo utilizado é composto mineralogicamente de caulinita, gibsitita, ilita/mica, quartzo, e goetita. Já quimicamente é composto por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e hematita (Fe_2O_3), possuindo uma perda ao fogo da ordem de 10,8%. Do ponto de vista físico, apresenta alto teor de areia (75 μm), 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 lama de cal utilizado é constituído, do ponto de vista mineralógico, basicamente de calcita (CaCO_3). Quimicamente ele é, principalmente, composto por óxido de cálcio (CaO), e apresenta uma perda ao fogo de 35,7%. Já fisicamente, apresenta alto teor de silte (2 - 75 μm), da ordem de 82,0%, e morfologia irregular com textura rugosa.
3. A incorporação de resíduo de lama de cal em substituição parcial ao cimento na mistura solo-cimento resultou no aumento da densidade aparente. Teor acima de 10% de resíduo reduz a resistência à compressão da mistura e acima de 20% de resíduo aumenta a absorção de água. As melhores propriedades da mistura foram obtidas para o traço com 10% de resíduo.
4. Os traços fabricados com teores de até 20% de resíduo apresentaram valores, médios e individuais, de resistência à compressão e absorção de água dentro da faixa estabelecida pela norma ABNT NBR 10834 (2012) para produção de tijolo solo-cimento.
5. A incorporação de resíduo de lama de cal na mistura solo-cimento estudada não promoveu alteração de fases cristalinas e nem microestrutural nos traços estudados.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

1. Produzir tijolos solo-cimento incorporados com resíduo de lama de cal e avaliar suas propriedades tecnológicas, visando seu emprego na construção civil.
2. Avaliar o efeito da incorporação de resíduo de lama de cal, com diferentes granulometrias, em substituição parcial do cimento em misturas solo-cimento, visando seu emprego na fabricação de tijolos solo-cimento.
3. Realizar um estudo do potencial econômico do uso de tijolos solo-cimento incorporados com resíduo de lama de cal na construção de casas populares.
4. Avaliar o efeito da adição do resíduo de lama de cal nas reações de hidratação do cimento.
5. Estudar a influência de outros tipos de cimento nas misturas solo-cimento-resíduo de lama de cal.
6. Avaliar a influência do resíduo de cal em misturas solo-cimento utilizando outros solos da região de Campos de Goytacazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, E. R. G. M. *Aproveitamento do Resíduo da Indústria de Celulose no Cultivo do Bambu*. (2011). 52 f. Dissertação (Mestrado em Química). - Programa de Pós-Graduação em Química, UFPE, Recife-PE, 2011. Disponível em: <http://200.17.137.108/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1351>. Acesso em: 5 out. 2015.

ALMEIDA, H.C., ERNANI, P.R.; MARIN, H.H.; ESCAPINI, E.H.; MACABÔ JUNIOR, J., (2007), *Influência da adição de um resíduo industrial alcalino na velocidade de neutralização da acidez do solo, adsorção de sódio e disponibilidade de magnésio para o trigo*. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages. 6, 104-113 Disponível em: <<http://revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/5364>>. Acesso em: 14 out. 2015.

Associação Brasileira de Celulose e Papel – BRACELPA (2014). *Evolução da Produção Brasileira de Celulose*. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/139>>. Acesso em: 2 jun. 2015.

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 do limite de plasticidade - Método de ensaio: NBR 7180. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) Rochas e solos - Terminologia: NBR 6502. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Bloco vazado de solo-cimento. Especificação. Método de ensaio: NBR 10834. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Bloco vazado de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Método de ensaio: NBR 10836. Rio de Janeiro.

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

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

BARBOSA, N., MATTONE, R. (2002) *Construção com terra crua*. Anais do I Seminário Ibero Americano de Construção com terra. Salvador. Brasil.

BELLOTE, A. F. J., SILVA, H. D., FERREIRA, C. A. (1998), *Resíduos Da Indústria De Celulose Em Plantios Florestais*, Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo;

BITENCOURT, E. R. de. (2004) *Utilização de matéria-prima alternativa na fabricação de tijolos de argila vermelha e branca*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Joinville - SC: Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 60 p. Disponível em http://www.tede.udesc.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=243. Acesso em: 14 de nov. 2015

CARVALHO, M. B. M. (2008) *Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável). Universidade de Brasília – UnB. Brasília-DF. 187 p. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/1878/1/Maria%20Beatriz%20Maury%20de%20Carvalho.pdf>>. Acesso em: 5 jul. 2015.

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.

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MARCELINO, R. & MAUAD, M. (2007) *Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário*. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 42:1307-1317.

CURI, N.; KÄMPF, N.; RESENDE, M. (1984) *Mineralogia, química, morfologia e geomorfologia de solos originados de rochas efusivas das encostas Superior e Inferior do Nordeste, no Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 8: 269-276.

FARIA, E. F. de (2004). *Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados*. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 130 p.

FIQUEROLA, V. (2004). *Alvenaria de solo-cimento*. Revista Técnica, Editora Pini, São Paulo-SP, nº 85. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/85/artigo286284-1.aspx>> Acesso em: 14 out. 2015.

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. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/warm.2008.161.1.23?journalCode=jwarm>> Acesso em: 14 out. 2015.

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. Disponível em: <<http://www.pos.demc.ufmg.br/2015/trabalhos/pg1/Monografia%20Lia.pdf>> Acesso em: 14 out. 2015.

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

GRANDE, F. M. (2003) *Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) –São Carlos- SP, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo - USP, 165p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-07072003-160408/pt-br.php>>. Acesso em: 14 out. 2015.

GUERRA, I. A. (2007) *Uso De Resíduos Industriais De Fábrica De Celulose E Papel Em Plantios De Eucalipto*. Tese (Livre Docência). Botucatu – SP, Faculdade de Ciências Agrônomicas.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2015). *Relatório Anual*. 64 p. Disponível em: http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf. Acesso em: 14 out. 2015.

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.

IZIDIO, L. L., SUBTIL, W. G., ANDRADE, A. A., (2013) *Utilização De Resíduos Sólidos Da Indústria Papeleira Como Matéria-Prima Para Fabricação De Tijolos*. IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 1, 2013, pp. 200-209. Disponível em: <http://amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/630/653>. Acesso em: 14 out. 2015.

LUXAN, M.P., MADRUGA, F., SAAVEDRA, J. (1989) *Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement*. *Cement in Concrete research*, London, 19:63-68. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884689900665>>. Acesso em: 14 out. 2015.

MÁS, E. (2002) Diagnóstico das matérias primas e metodologia da extração das matérias primas. Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha.

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

NEVES, E. M. (2013) *Estudo para reaproveitamento do resíduo lama de cal do processo KRAFT de fabricação de celulose e papel em cerâmicas de revestimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – - Ponta Grossa- PR, Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, 99p.

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

OLIVEIRA, E. C. (2009) *Tufas Cálcareas da Serra da Bodoquena*. Dissertação (Mestrado) – São Paulo - SP, Universidade de São Paulo – USP.

OLIVEIRA, H. A., CUNHA, E. S., GIBO, R. M., BRESSIANI, J. C. (1999) *Aproveitamento De Resíduo Do Processo De Fabricação De Papel Em Massas De Revestimento Tipo Semi Gres*. Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Disponível em:

https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj8896i28XKAhWJ1h4KHVEBBu4QFggIIMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.ipen.br%2Fbiblioteca%2F1999%2F43cbc%2F04459.doc&usg=AFQjCNEFivgd2Fnplj3fmApAeLp_elwYtQ. Acesso em: 14 nov. 2015.

OLIVEIRA, H.A. (2000) *Estudo para reaproveitamento do resíduo lama de cal do processo KRAFT de fabricação de celulose e papel em cerâmicas de revestimento*. Dissertação (Mestrado) - São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

PERUZZI, A. de P. (2002) *Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa*. Dissertação (Mestrado). São Carlos - SP, Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

PISANI, M. A. J. (2004) *Execução do tijolo de solo-cimento*. Relatório. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo.

Portela, W. (s.d.). Acesso em 23 de Dezembro de 2015, disponível em <http://www.tijolosolocimento.com.br/p/contato.html>

PORTELA, W. (s.d.). Disponível em: <<http://www.tijolosolocimento.com.br/2014/11/as-desvantagens.html>>. Acesso em: 1 de agosto de 2015.

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

RODRIGUES, C. M. (2004) Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do *Pinus taeda* L. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Curitiba – PR, Universidade Federal do Paraná.

ROSENTHAL, E. (2004) *Cimento: Um elemento básico para o progresso e para o aquecimento global*. New York Times, Nova York, Estados Unidos da América. Disponível em: <<http://www.geografiaparatodos.com.br/index.php?pag=sl212>>. Acesso em: 14 out. 2015.

SANTI, A. M. M., FILHO, A. O. S. (2004) *Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: casos na região do calcário ao norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações*. II Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – ANPPAS. Campinas. Brasil. Disponível em: <http://www.ifch.unicamp.br/profseva/anppas04_SantiSeva_cimento_RMBH.pdf>. Acesso em: 14 out. 2015.

SANTOS, A. D. (2004) *Estudo de propriedades de físicas e químicas de um novo cimento selador endodôntico*. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Ilha Solteira - SP. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 68 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88360>>. Acesso em: 14 out. 2015.

SANTOS, P.S. (1975) *Tecnologia de argilas: Fundamentos*. São Paulo: Edgard Blucher, 340 p

SILVA, A. R. V., FERREIRA, H. C. (2008) Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. *Revista Eletrônica de*

Materiais e Processos, Campina Grande - PB, 3.2:26-35. Disponível em <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/77/91>. Acesso em: 31 de dez. 2015

SILVA, S. R. (2005) *Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Belo Horizonte – MG, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 219p. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUDB-8C5PAL/tijolos_de_solo_cimento_refor_ado..._sandra_regina_da_silva.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 out. 2015.

SIMONETE, M. A., CHAVES, D. M., TEIXEIRA, C. F. A., MORO, L., NEVES, C. U. (2013) *Fornecimento De Cálcio Para Plantas De Eucalyptus Saligna Por Meio De Aplicação De Resíduo Industrial Lama De Cal*. XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 37:1343-1351.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2013). *Relatório Anual*. Rio de Janeiro – RJ. 40 p. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2015.

SIQUEIRA, F. B. (2013) *Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 121 p. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%C3%A7%C3%A3o-FAbr%C3%ADcio-Bagli-Siqueira.pdf>> Acesso em: 14 out. 2015.

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, 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.* 6:43-49 Disponível em: http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v06n06/v6n6_6.pdf. Acesso em: 14 dez. 2015.

WOLFF, E. (2008) *O uso do lodo da estação de tratamento de água e resíduos de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha.* Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Belo Horizonte-MG, Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, 188 p. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/25D.PDF>>. Acesso em: 14 out. 2015.

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: 3 jan. 2015.