

**REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE MADEIRA NA
PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO: FORMULAÇÃO,
PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA**

SIMONE VALÉRIA RIBEIRO

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE- UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES- RJ
DEZEMBRO DE 2017**

**REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE MADEIRA NA
PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO: FORMULAÇÃO,
PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA**

SIMONE VALÉRIA RIBEIRO

“Tese de doutorado apresentado 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 Ciências dos Materiais”.

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
DEZEMBRO DE 2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

17/2018

Ribeiro, Simone Valéria

Reutilização de resíduo de cinza de madeira na produção de tijolo solo-cimento :
formulação, propriedades e microestrutura / Simone Valéria Ribeiro. – Campos dos
Goytacazes, 2017.

xx, 105 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia.
Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2017.

Orientador: José Nilson França de Holanda.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 94-105.

1. RESÍDUOS DE CINZA DE MADEIRA – REAPROVEITAMENTO 2.
SOLO-CIMENTO I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

CDD 620.135

**REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE MADEIRA NA
PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO: FORMULAÇÃO,
PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA**

SIMONE VALÉRIA RIBEIRO

“Tese de doutorado apresentado 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 Ciências dos Materiais”.

Aprovado em 18 de dezembro de 2017.

Comissão Examinadora:

Prof. Elaine Cristina Pereira (D. Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) - UENF

Prof. Fabrício Bagli Siqueira (D. Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) - UCAM

Prof. Mateus Carvalho Amaral (D. Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) - UFF

Prof. José Nilson França de Holanda (D. Sc., Engenharia de Materiais) - UENF

Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho àqueles que me deram a vida, meus queridos e amados pais, que na simplicidade de suas vidas me ensinaram tudo. Ensinaram a amar Àquele que me amou primeiro antes mesmo de ser gerada: Deus.

Dedico também ao meu irmão que me ensina a cada dia a amar e ser amada. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e família que me deste;

Aos meus pais: José Geraldo Ribeiro e Maria Aparecida Vital Ribeiro por entender minha ausência na busca da realização de um sonho;

Ao meu irmão e todos os outros familiares e amigos pelo incentivo;

Ao meu professor e orientador José Nilson França de Holanda pela confiança, ajuda e incentivo durante a realização desse trabalho.

A Arte Cerâmica Sardinha, representada por seu proprietário Rodolfo Gama, o qual forneceu o solo e o resíduo cinza de madeira para o trabalho.

Aos professores Elaine, Fabrício e Mateus por aceitarem fazer parte desta banca.

A todos os professores que passaram por minha formação e compartilharam seus conhecimentos.

Aos meus amigos do LAMAV: Ianne, Dhyemila, Darlan e Thiago, pela confiança, amizade e carinho em todos os momentos que precisei; Bárbara e Geovana, pela grande ajuda, Elisângela, Sandro e Valdenir pelo apoio nas etapas deste trabalho e os demais colegas da pós-graduação, pela amizade.

Aos secretários e técnicos do LAMAV e LECIV: Gabriel, Shirlene, Milton e Vanússia, que me ajudaram na realização dos ensaios para este trabalho.

A Uenf pela oportunidade e espaço físico.

A todos que me ajudaram direta e indiretamente no desenvolvimento dessa tese.

Muito Obrigada.

"Como a corça anseia pelas águas vivas, assim minha alma suspira por vós, ó meu Deus. Minha alma tem sede de Deus, do Deus vivo." Sl 42, 2-3.

"Para os montes levanto os olhos: de onde me virá socorro? O meu socorro virá do Senhor, criador do céu e da terra.

Ele não permitirá que teus pés resvalém; não dormirá aquele que te guarda. Não, não há de dormir, nem adormecer o guarda de Israel.

O Senhor é teu guarda, o Senhor é teu abrigo, sempre ao teu lado. De dia, o sol não te fará mal; nem a lua durante a noite.

O Senhor te resguardará de todo o mal; ele velará sobre tua alma. O Senhor guardará os teus passos, agora e para todo o sempre." Sl 120.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	XI
Lista de Tabelas	XVII
Capítulo 1. Introdução	1
1.1. Aspectos gerais	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificativas	2
1.4. Ineditismo.....	3
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Matérias primas para a fabricação de tijolos solo-cimento	5
2.1.1. Solo.....	5
2.1.2. Cimento.....	7
2.1.3. Água.....	13
2.2. Tijolo solo-cimento	13
2.3. Formas e dimensões dos tijolos solo-cimento	14
2.4. Vantagens do solo-cimento	19
2.5. Etapas de fabricação do tijolo solo-cimento.....	22
2.5. Resíduo sólido	26
2.5.1. Classificação dos resíduos sólidos	26
2.6. Biomassa.....	27
2.6.1. Utilização de resíduo de madeira em tijolos solo-cimento	32
2.7. Cinzas.....	33
2.7.1. Utilização de cinzas vegetais na cerâmica vermelha	34

2.7.2. Utilização de cinzas de madeira em materiais de construção	36
Capítulo 3. Materiais e Métodos.....	43
3.1. Matérias-primas.....	44
3.2. Metodologia.....	44
3.2.1. Beneficiamento das Matérias-Primas.....	44
3.2.2. Caracterização das Matérias-Primas.....	44
3.2.2.1. Difração de raios-X.....	45
3.2.2.2. Composição química	45
3.2.2.3. Análises Térmicas (ATD/TG).....	46
3.2.2.4. Análise granulométrica.....	46
3.2.2.5. Plasticidade.....	46
3.2.2.6. Atividade pozolânica.....	47
3.2.2.7. Teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH da cinza de madeira.....	47
3.2.3. Preparação dos traços com adição de resíduo sólido de cinza de madeira	48
3.2.4. Preparação dos corpos-de-prova.....	49
3.2.5. Etapas de cura dos corpos-de-prova.....	50
3.2.6. Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova.....	51
3.2.6.1. Massa específica Bulk.....	51
3.2.6.2. Variação dimensional.....	51
3.2.6.3. Resistência à compressão.....	51
3.2.6.4. Absorção de água.....	52

3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos-de-prova.....	53
Capítulo 4. Resultados e discussão	54
4.1.Caracterização das matérias-primas utilizadas.....	54
4.1.1.Análise mineralógica.....	54
4.1.2. Análise química.....	56
4.1.3. Análise granulométrica.....	59
4.1.4. Plasticidade.....	61
4.1.5. Análise térmica.....	62
4.1.6. Análise da atividade pozolânica da cinza de serragem de madeira.....	64
4.1.7. Teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH.....	65
4.1.8. Análise morfológica da cinza de serragem de madeira.....	65
4.2. Avaliação das propriedades tecnológicas dos corpos de prova incorporados com resíduo de cinza de madeira.....	67
4.2.1. Massa específica aparente.....	67
4.2.2. Variação dimensional.....	68
4.2.3. Resistência à compressão.....	69
4.2.4. Absorção de água.....	71
4.3. Análise de fases.....	73
4.4. Análise microestrutural.....	77
4.4.1. Microscopia confocal.....	77
4.4.2. Microscopia eletrônica de varredura.....	84
Capítulo 5 – Conclusões.....	91

5.1. Conclusões.....	91
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	92
Referências bibliográficas.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura do solo (fases sólida, líquida e gasosa) (Grande, 2003).....	5
Figura 2.2 - Divisão dos subhorizontes no solo (Pena, 2015)	6
Figura 2.3 – Clínquer na sua forma original. Disponível em < https://ecivilufes.wordpress.com/2013/06/05/revolucao-na-fabricacao-do-cimento/ >.	9
Figura 2.4 – Composição do cimento Portland com suas possíveis adições (ABCP, 2002)	10
Figura 2.5 – Tijolo solo-cimento de Encaixe nas Quatro Faces, de Solo-Cimento (www.ecomaquinas.com,2015)	15
Figura 2.6 – Tijolo solo-cimento trilho (www.ecomaquinas.com, 2015).....	15
Figura 2.7 – Tijolo solo-cimento Canaleta Padrão ou “U” (www.ecomaquinas.com, 2015; http://www.santorin.com.br , 2015).....	15
Figura 2.8 – Tijolo solo-cimento formando coluna. (http://proyectoprensamanual.webnode.es/ , 2015; paoeecologia.wordpress.com , 2015).....	16
Figura 2.9 – Tijolo maciço de solo-cimento com encaixe e churrasqueira feita de solo cimento. (http://hidroshow.blogspot.com.br , 2015).....	16
Figura 2.10 – Meio Tijolo de solo-cimento com encaixe. (www.ecomaquinas.com, 2015).....	17
Figura 2.11 – Tijolo solo-cimento metade e inteiro. (http://www.monteirotijolos.com e http://hidroshow.blogspot.com.br , 2015).....	17
Figura 2.12 – Construção com solo-cimento (Meireles, 2014).....	20
Figura 2.13 – Casa construída com solo-cimento na cidade de Cambuquira – MG (Disponível em http://www.cambuquira.net/ , 2014).....	20

Figura 2.14 – Fluxograma do processo de fabricação de tijolos do tipo solo-cimento (adaptado Pisani, 2007; Pedroti, et. al. 2007).....	22
Figura 2.15 – Prensas disponíveis no mercado para a produção de tijolos solo-cimento. (a) Prensa manual Permaq MTS-010, capaz de produzir até 2 mil tijolos/dia. (b) Prensa com alimentação automática Man P6, produz de 800 a 1200 peças/h. (c) Prensa manual da empresa Gutward. (d) Prensa hidráulica sobre duas rodas da empresa Eco-Máquinas, pode produzir 3500 tijolos/dia. (e) Prensa automática da Andrade Gutierrez. (f) Prensa manual da Sahara que produz de 100 a 300 peças por hora. (Figuerola, 2004; Destefani, 2009)....	24
Figura 2.16 – Importância do tipo de cura na resistência à compressão. (Silva, 2005; apud CEPED, 1999).....	25
Figura 2.17 – Classificação de resíduos sólidos segundo a ABNT 10004(2004)	27
Figura 2.18 – Oferta interna de energia no Brasil em 2013 – OIE (%) (Ministério de Minas e Energia, 2014).....	29
Figura 2.19 – Consumo final de energia do Estado do Rio de Janeiro em 2013. (ADRIO, 2014).....	30
Figura 2.20 – Consumo final de energia por fontes na região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro em 2013 (ADRIO, 2014).....	30
Figura 2.21 – Difratoograma de raio X da cinza da queira de tora de eucalipto (Vaske, 2012).....	37
Figura 2.22 – Micrografia eletrônica de varredura da amostra de cinza. a) Ampliada 2500 vezes. b) Ampliada 10000 vezes (Vaske, 2012).....	38
Figura 2.23 – Resistência à compressão dos corpos de provas para as adições de CME (Gluitz e Marafão, 2013).....	39
Figura 2.24 – Cinza da lenha de Eucalipto. a) Retirada direto da caldeira; b) Após retirada da caldeira foi moída em moinho de bolas e em c) requeimada (Resende, 2013).....	40
Figura 2.25 – Micrografia obtida por MEV. a) Cinza in natura com aumento de 250x; b) Cinza moída com aumento de 1000x e c) Cinza requeimada com	41

aumento de 250x (Resende, 2013).....	
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho.....	43
Figura 3.2 – Prensa hidráulica para fabricação de corpo de prova. (Rodrigues, 2012).....	49
Figura 3.3 - Matriz cilíndrica para fabricação de corpo de prova. (Rodrigues, 2012).....	50
Figura 3.4 – Câmara úmida para processo de cura (Rodrigues, 2012).....	50
Figura 3.5 – Máquina utilizada no ensaio de compressão simples.....	52
Figura 3.6 – Difratorômetro de raios X modelo XRD7000, marca SHIMADZU (Gomes, 2016).....	53
Figura 4.1. – Difratoograma de raios X do resíduo de cinza de madeira: Q= Quartzo; Ca=Calcita; G=Gibsite; Mo=Montmorilonita; Go=Goetita; K=Caulinita; P=Fosfato de Cálcio; Po=Portlandita; Mg=Sulfato de magnésio hidratado.....	54
Figura 4.2 – Difratoograma de raios X do solo arenoso: C - Caulinita; G - Gibsite; Go - Goetita; I/M - Ilita/Mica; Q - Quartzo.....	55
Figura 4.3 – Difratoograma de raios X do cimento Portland CPIII-40RS: Ft = Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF); A = Alita (C ₂ S); C = Carbonato de cálcio; B = Belita (C ₂ S); At = Aluminato tricálcio (C ₃ A); O = Óxido de cálcio; G = Gibsite (CaSO ₄).....	56
Figura 4.4 – Distribuição de tamanho de partícula do resíduo de cinza de madeira.....	59
Figura 4.5 – Distribuição de tamanho de partícula do solo arenoso.....	60
Figura 4.6 – Curva de análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG) do solo arenoso.....	63
Figura 4.7 – Curva de análise termogravimétrica (ATG) do resíduo de cinza de madeira.....	64

Figura 4.8 – Microscopia eletrônica de varredura do resíduo de cinza de madeira: a) com aumento de 200x e em b) com aumento de 300x.....	66
Figura 4.9 – Espectro de EDS do resíduo de cinza de madeira.....	67
Figura 4.10 – Massa específica Bulk dos corpos de prova após processo de cura de 28 dias.....	68
Figura 4.11 – Variação Volumétrica, diametral e linear dos corpos de prova após cura de 28 dias.....	69
Figura 4.12 – Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos, incorporados com resíduo de cinza de madeira.....	70
Figura 4.13 – Resistência à compressão individual dos corpos de prova cilíndricos, incorporados com resíduo de cinza de madeira.....	71
Figura 4.14 – Resultados do ensaio de absorção de água dos corpos de prova após cura de 28 dias.....	72
Figura 4.15 – Resultados do ensaio individual de absorção de água dos corpos de prova após cura de 28 dias.....	73
Figura 4.16 – Difração de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 10 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; Mi = Microcrina; Po = Portlandita; Ca = Caulinita; G = Goetita; I = Ilita; Q = Quartzo; Cr = Cristobalita; H = Hematita e F = Feldspato sódico.....	74
Figura 4.17 – Difração de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 20 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; Mi = Microcrina; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Goetita; I = Ilita; Si = Silicato de cálcio hidratado; Po = Portlandita; Cr = Cristobalita; Q = Quartzo; H = Hematita e F = Feldspato sódico.....	75
Figura 4.18 – Difração de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 30 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Goetita; I = Ilita; Q = Quartzo; Po = Portlandita; H	76

= Hematita e Si = Silicato de cálcio (Ca_3SiO_5).....

Figura 4.19 – Difração de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 40 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; Mi = Microcrina; E = Etringita; Ca = Caulinita; G = Goetita; I = Ilita; Po = Portlandita; Si = Silicato de cálcio; Cr = Cristobalita; Q = Quartzo; H = Hematita e F = Feldspato sódico..... 77

Figura 4.20 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X..... 78

Figura 4.21 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 10 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X..... 79

Figura 4.22 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 20 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X..... 80

Figura 4.23 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 30 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X..... 81

Figura 4.24 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 40 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X..... 82

Figura 4.25 – Microestrutura da superfície de fratura para as composições de 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo de cinza de madeira, respectivamente..... 83

Figura 4.26 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura sem resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x..... 84

Figura 4.27 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 10 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x..... 85

Figura 4.28 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 20 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x..... 86

Figura 4.29 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 30 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x..... 87

Figura 4.30 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 40 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x..... 88

Figura 4.31 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com aumento de 1000 x. Com adição de resíduo de cinza de madeira de: a) 0 %; b) 10 %; c) 20 %, d) 30 % e e) 40 %..... 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Divisões do solo de acordo com algumas instituições (Cabala, 2007).....	7
Tabela 2.2 – Composição química do clínquer (ABCP, 2002).....	9
Tabela 2.3 – Classificação e composição do Cimento Portland (ABCP, 2002)...	11
Tabela 2.4 – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CPIII-40RS (Pinto, 2010).....	11
Tabela 2.5 – Normas em vigor da Associação Brasileira de Normas Técnicas para a produção de solo-cimento. Disponível em: http://www.abntcatalogo.com.br	18
Tabela 2.6 – Comparativo do valor total de uma alvenaria convencional x alvenaria com tijolo solo-cimento (adaptado Lima, 2013).....	21
Tabela 2.7 – Características do solo para a fabricação de tijolos de solo-cimento (ABNT, 2012)	23
Tabela 2.8 – Consumo das fontes energéticas utilizadas nas indústrias cerâmicas do estado do Rio de Janeiro no ano de 2013 (ADRIO, 2014).....	31
Tabela 2.9 – Produção de energia primária e secundária no estado do Rio de Janeiro no ano de 2013 (ADRIO, 2014).....	32
Tabela 2.10 – Valores percentuais médios (%) dos compostos químicos presentes na cinza (Vaske, 2012)	37
Tabela 3.1 – Caracterização física do cimento Portland CP III – 40RS (Amaral, 2016).....	48
Tabela 3.2 – Composição dos traços para corpo de prova unitário.....	49
Tabela 4.1 – Composição química do solo, do resíduo de cinza de madeira e do cimento Portland utilizados.....	57
Tabela 4.2 – Composição granulométrica do solo e as porcentagens	61

recomendadas pelo CEPED (1999) e ABCP (2002).....	
Tabela 4.3 – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).....	62
Tabela 4.4 – Classificação da atividade pozolânica e o índice de atividade do resíduo de lama de cal obtido utilizando o método de Luxan <i>et al.</i> (1989).....	64
Tabela 4.5 – Características do resíduo cinza de madeira.....	65

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

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO: FORMULAÇÃO, PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA

Simone Valéria Ribeiro

18 de dezembro de 2017

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

As indústrias cerâmicas da região norte do estado do Rio de Janeiro utilizam principalmente lenha de madeira como fonte de energia durante o processo de queima das peças cerâmicas. A queima de lenha de madeira como combustível gera enorme quantidade de um resíduo sólido denominado resíduo de cinza de madeira na forma de pó fino que, caso não tenha um destino final correto, pode resultar em malefícios para as pessoas e para o meio ambiente. Portanto se faz necessário pesquisar uma alternativa tecnológica viável para a reciclagem deste resíduo sólido. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é analisar os efeitos da incorporação do resíduo de cinza de madeira, proveniente da indústria de cerâmica vermelha, na fabricação de corpos cimentícios para uso em tijolo do tipo solo-cimento. O resíduo de cinza de lenha utilizado foi caracterizado com relação à composição química, difração de raios X, atividade pozolânica e granulometria. Foram preparados corpos de prova cilíndricos por prensagem uniaxial com incorporações de 0, 10, 20, 30 e 40 % em peso de resíduo sólido em substituição ao cimento Portland. Após prensagem, os corpos cimentícios foram curados por um período de 28 dias em câmara úmida. As seguintes propriedades tecnológicas foram determinadas: absorção de água, densidade aparente, variação dimensional e resistência à compressão. Os corpos de prova incorporados com resíduo de cinza apresentaram resistência à compressão acima dos valores recomendados pela NBR 10834 e valores individuais de absorção de água abaixo de 22 % nas incorporações de 10 e 30 % de resíduo. A incorporação de 30 % de resíduo de cinza apresentou as melhores propriedades tecnológicas.

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

**REUSE OF WOOD ASH RESIDUE IN THE PRODUCTION OF SOIL-CEMENT
BRICK: FORMULATION, PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE.**

Simone Valéria Ribeiro

December 18th, 2017

Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda

The ceramic industries of the northern region of the state of Rio de Janeiro mainly use wood firewood as a source of energy during the burning process of the ceramic pieces. The burning of wood firewood as fuel generates an enormous amount of a solid waste called wood ash residue in the form of fine powder which, if it does not have a correct final destination, can result in harm to people and the environment. Therefore, it is necessary to investigate a viable technological alternative for the recycling of this solid residue. In this context, the main objective of this work is to analyze the effects of the incorporation of wood ash residue from the red ceramics industry in the manufacture of cement-based materials for use in soil-cement brick. The wood ash residue used was characterized with respect to chemical composition, X - ray diffraction, pozzolanic activity and grain size. Cylindrical test specimens were prepared by uniaxial pressing with incorporations of 0, 10, 20, 30 and 40% by weight of solid residue replacing the Portland cement. After pressing, the cementitious bodies were cured for a period of 28 days in a humid chamber. The following technological properties were determined: water absorption, apparent density, dimensional variation and compressive strength. The specimens with ash residue had a compressive strength above the values recommended by NBR 10834 and individual values of water absorption below 22% in the incorporations of 10 and 30% of residue. The incorporation of 30% of ash residue presented the best technological properties.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Aspectos Gerais

Nos últimos anos o Brasil e o mundo têm conferido grande importância às metodologias e aos estudos de reutilização de resíduos sólidos industriais poluentes por incorporação em materiais cerâmicos para a construção civil.

Estes métodos consistem, por exemplo, em adicionar partes de resíduo sólido em uma matriz cerâmica comumente usada na fabricação de materiais cerâmicos, tais como: tijolos maciços, blocos cerâmicos, telhas, revestimentos de piso e parede, argamassas e tijolos solo-cimento para sua posterior utilização na construção civil (Andreola, et al., 2008; Menezes, et al., 2010; Bruxel, et al., 2012; Herek, et al., 2013; Ribeiro, 2013; Amaral, 2016).

Ao incorporar resíduos sólidos poluentes em materiais para a construção civil, percebe-se que o processo produtivo da massa cerâmica geralmente não sofre grandes modificações com a introdução do resíduo. Isso acontece porque os produtos cerâmicos para construção civil permitem larga variabilidade de sua composição química e mineralógica e esses resíduos poluentes geralmente ficam inertizados na estrutura do material cerâmico (Pinheiro, 2009).

Como a indústria da construção civil consome enorme volume de matérias-primas naturais verifica-se que a substituição de parte delas por resíduos sólidos contribui para a diminuição do consumo destas matérias-primas naturais não renováveis na área industrial (Freire, et al., 2008).

O Brasil se destaca pela grande atividade industrial de produtos derivados de cerâmica vermelha, principalmente na região norte do estado do Rio de Janeiro. Estas indústrias têm contribuído com a economia estadual e nacional gerando riquezas, empregos e desenvolvimento social (Ramos, et al., 2006). Na etapa de queima da produção de cerâmica vermelha, porém, tem se consumido uma grande quantidade de energia.

No Brasil a produção em massa de energia elétrica renovável se sobressai, principalmente na produção de energia hidráulica responsável por 70 % da oferta interna. Mas nos períodos de secas como os que estamos enfrentando, ocorre uma diminuição da produção nos parques hidrelétricos e, assim, uma das alternativas

energética para suprir essa falta de energia é a cogeração de energia utilizando resíduos vegetais (Denadai, 2014).

As indústrias cerâmicas também têm utilizado vegetais, como a madeira de eucalipto, como fonte de energia para realizar o processo de queima da cerâmica vermelha. Esta atividade gera enorme quantidade de resíduo em forma de cinza, que pode causar consequências negativas à segurança do meio ambiente e das pessoas (Neto, 2016). O resíduo de cinza derivada da queima de madeira não tem uma aplicação prática definida. Por este motivo, ele é geralmente descartado principalmente em solos, contaminando o meio ambiente. De forma que a introdução de novos métodos de reciclagem deste resíduo sólido é de alto interesse acadêmico, econômico, ambiental e social.

Na presente tese de Doutorado se estudou a viabilidade de se incorporar resíduo de cinza de madeira, proveniente dos fornos da indústria de cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes, para a fabricação de tijolo solo-cimento. Em particular, o resíduo de cinza de madeira foi utilizado em substituição parcial do cimento Portland.

1.2 – Objetivos

O objetivo principal deste projeto de doutorado foi avaliar a possibilidade de incorporação de resíduo de cinza de madeira na fabricação de tijolo do tipo solo-cimento. Ênfase especial será dada a formulação, processamento e ao efeito da adição do resíduo de cinza nas propriedades técnicas e microestrutura do tijolo solo-cimento.

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterização das matérias-primas.
- b) Formulação e preparação dos traços contendo resíduo de cinza de madeira.
- c) Preparação dos corpos de prova de solo-cimento.
- d) Caracterizações física, mecânica e microestrutural dos corpos de prova.

1.3 – Justificativas

Esta Tese de Doutorado buscou desenvolver corpos de prova de solo-cimento incorporados com resíduo de cinza de madeira gerada no processo de queima de

cerâmica vermelha. Este resíduo foi incorporado em substituição parcial do cimento Portland. Os tijolos solo-cimento são considerados como sendo tijolos ecológicos, uma vez que não será necessário realizar a etapa de queima, quando comparados com os tijolos convencionais. Ressalta-se também que estes tijolos apresentam excelentes características físicas e mecânicas e baixo custo, que os tornam altamente atrativos para fabricação de casas populares para a população de baixa renda. A indústria da cerâmica vermelha é a principal fornecedora de materiais para alvenarias e coberturas para uso residencial e comercial no Brasil, e produz mensalmente quatro bilhões de blocos de vedação estrutural e 1,3 bilhões de telhas (Anicer, 2015).

No processo de queima dos blocos e telhas, os fornos das cerâmicas utilizam lenha como um dos principais combustíveis e, assim, são gerados enormes quantidades de resíduos em forma de cinza. Portanto, o desenvolvimento de uma tecnologia para reutilização destes resíduos de forma ambientalmente correta é altamente benéfica para a indústria de cerâmica vermelha da cidade de Campos do Goytacazes que é responsável por cerca de 40 % da produção de cerâmica vermelha do Estado do Rio de Janeiro (Pedroti, et al, 2011). Portanto, espera-se contribuir para a busca de uma solução tecnológica viável como alternativa ao método tradicional de disposição deste resíduo poluente. Do ponto de vista científico, ressalta-se a importância e desafio de se determinar às condições de processamento, propriedades tecnológicas e microestrutura da matriz cimentícia incorporado com cinza da queima de madeira sem alterar as suas propriedades técnicas.

1.4 – Ineditismo

O principal combustível das indústrias de cerâmicas vermelhas da região norte fluminense é a madeira. O resíduo de cinza resultante da queima da madeira é um material rico em carbonato de cálcio e apresenta também quartzo, hidróxido e fosfato de cálcio (Borlini, et al. 2005). Portanto, esse resíduo é rico em componentes presentes no cimento e nas matérias-primas naturais usadas na fabricação de cerâmicas tradicionais. Isto significa que o resíduo de cinza de madeira pode ser uma importante fonte de matéria-prima alternativa de baixo custo para a substituição do cimento em massas cimentícias para tijolo solo-cimento.

Estudos prévios (Borlini, et al., 2005; Medeiros et al., 2010; Gluitz e Marafão, 2013) têm mostrado o potencial de utilização da cinza de madeira em cerâmica vermelha e argamassas. Na literatura existe somente um trabalho de produção de tijolo solo-cimento reforçado com resíduos de madeira derivados da construção civil (Santos, 2009), porém, este resíduo não foi analisado em forma de cinza. De forma que se verifica na literatura que existe uma lacuna sobre o reuso da cinza da queima de madeira para a produção de tijolos solo-cimento.

Portanto a presente tese analisou o potencial da incorporação da cinza da queima de madeira em substituição parcial de cimento Portland para a fabricação de tijolos do tipo solo-cimento.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Matérias primas para a fabricação de tijolos solo-cimento

2.1.1 – Solo

Há pelo menos dez mil anos o solo tem sido utilizado como material de construção nas culturas antigas como a grega e a romana. Antigamente os abrigos para proteger o homem das ações do meio ambiente eram feitos por construções com terra utilizando apenas o solo. O escrito mais antigo de uma construção com terra é de 5000 a.C. na Mesopotâmia com adobe e em 4500 a.C. quando foi encontrado um novo registro de construção com terra estabilizada, ou seja, terra misturada com cinzas e moldadas com adobe (Pereira e Pezzuto, 2010).

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013) define solo como o conjunto de corpos naturais nos estados sólido, líquido e gasoso e com estruturas tridimensionais, formado por minerais e materiais orgânicos, localizados no manto superficial do nosso planeta.

Segundo Pinto (1998) apud Grande (2003), o solo é uma coleção de partículas sólidas resultantes do processo de desagregação de rochas que sofreram ações físicas ou químicas, água (ou outro líquido) e ar em seus espaços intermediários (Figura 2.1).

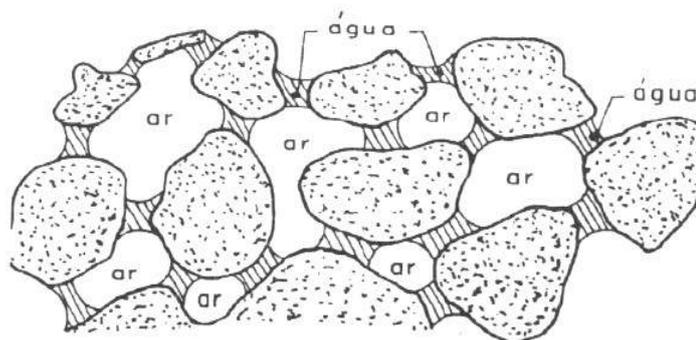


Figura 2.1 – Estrutura do solo (fases sólida, líquida e gasosa) (Grande, 2003).

Com o passar dos anos e sob a ação do clima, da água, relevo e decomposições químicas que atinge a superfície terrestre, as rochas vão se transformando em solo. O solo sofre adições, perdas e transformações de energia e

matéria e vai formando seções aproximadamente paralelas denominadas camadas e/ou horizontes (Embrapa, 2013).

Esses horizontes podem ser divididos nos subhorizontes O, A, B, C e Rocha mãe (Figura 2.2). O Horizonte O apresenta uma superfície com alta concentração de matéria orgânica de origem animal e vegetal; O Horizonte A apresenta-se normalmente na cor escura pela presença de matéria orgânica e contém perda de argilas minerais, ferro e alumínio; No Horizonte B encontra-se muito acúmulo de argilas silicatadas minerais ou de ferro; O Horizonte C é formado por material de origem residual e o Horizonte R, chamado de R de “rock” é a rocha matriz, afirma Vieira (1975) apud Cabala (2007).

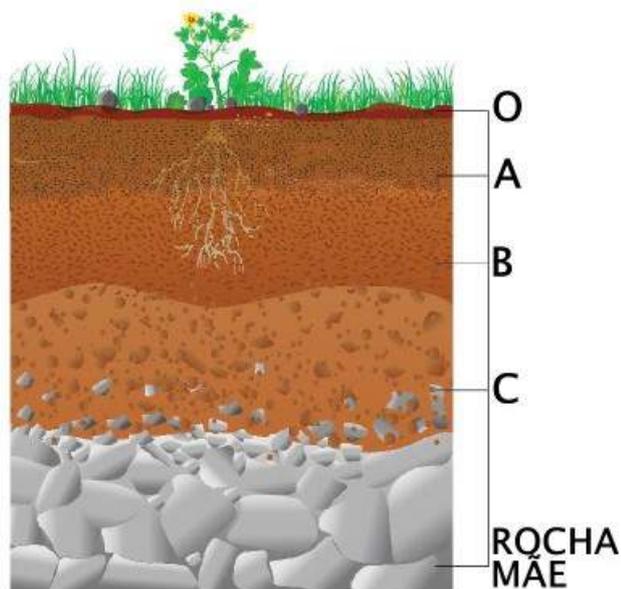


Figura 2.2 - Divisão dos subhorizontes no solo (Pena, 2015).

De acordo com Azambuja (1979) apud Grande (2003), no horizonte A é possível encontrar celulose que é um material inerte e húmus que é um ácido orgânico que apresenta afinidade química com a cal livre (CaO) liberada no processo de hidratação do cimento e que pode afetar a resistência do material; se isso acontecer é necessário adicionar cal no solo antes da adição de cimento. No horizonte B o solo tem característica argilosa e de difícil destorroamento o que consiste em um problema no processo de homogeneização da mistura do solo-cimento. No horizonte C encontram-se os solos com as melhores características para o emprego no solo-cimento por serem arenosos e de destorroamento fácil apesar de poderem conter partículas friáveis que exige um estudo de dosagem ideal antes de sua utilização.

A Tabela 2.1 apresenta a nomenclatura relacionada a granulometria das partículas sólidas do solo de acordo com a Escala Granulométrica Brasileira (ABNT), a escala Internacional ou de Atterberg e da escala utilizada pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Tabela 2.1 – Divisões do solo de acordo com algumas instituições (Cabala, 2007).

<i>Divisões do solo</i>	<i>ABNT (mm)</i>	<i>Divisões do solo</i>	<i>Atterberg (mm)</i>	<i>Divisões do solo</i>	<i>USDA (mm)</i>
Areia	0,05 – 4,8	Areia Grossa	0,20 - 2	Areia muito grossa	1- 2
				Areia grossa	0,5 – 1
		Areia Fina	0,02 – 0,20	Areia média	0,25 - 0,5
				Areia fina	0,1- 0,25
				Areia muito fina	0,05 – 0,1
Silte	0,005 – 0,05	Silte	0,002 - 0,02	Silte	0,002 – 0,05
Argila	Menor que 0,005	Argila	Menor que 0,002	Argila	Menor que 0,002

Quase todos os solos podem ser estabilizados com cimento e usados para a produção de solo-cimento, porém os mais utilizados do ponto de vista econômico são os que precisam de baixos teores de cimento para a sua estabilização, afirma Ferreira et al. (2008).

2.1.2 - Cimento

O cimento foi descoberto há cerca de 4500 anos. A palavra cimento é derivada do latim *caementu* e era utilizada pelos romanos para denominar as pedras naturais de rochedos e não esquadrejadas e as cinzas vulcânicas das ilhas gregas da região de Pozzuoli composta por cal com pozolana. Essas cinzas vulcânicas foram utilizadas na construção de obras na Grécia e Roma como o Panteão e o Coliseu e em pontes e aquedutos (Grande, 2003; Rodrigues, 2008; Battagin, 2009; Lima, 2010).

O cimento Portland teve sua origem por volta de 1756, na Inglaterra, quando o engenheiro John Smeaton procurou um aglomerante que endurecia em presença de água para reconstrução de um farol na Inglaterra e conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland. Nesse período ele obteve um pó fino resultante da queima de pedras calcárias e argila que, depois de sofrerem um processo de secagem, tornaram-se muito duras, como as pedras utilizadas em construções da época, e não se dissolviam em água. Este pó foi denominado então cimento Portland por causa de sua cor e suas propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às das rochas da ilha britânica de Portland (Santos, 2004; SNIC, 2006; Battagin, 2009).

O cimento Portland é um pó fino que apresenta propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes e, por isso, quando é submetido à água, endurece e não se decompõe quando incorporado à água novamente. Ao ser misturado com água, areia, pedra brita, cal, pó de pedra e outros materiais de construção forma-se os concretos e argamassas utilizadas nas construções em geral como casas, edifícios, pontes, barragens, etc. Do ponto de vista químico o cimento Portland é o material mais ativo dos concretos e argamassas porque ele é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais no produto final desejado, afirma a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002).

O concreto é provavelmente o material sólido mais abundante de todos os outros produzidos e o cimento Portland ou hidráulico é o componente-chave do setor da construção civil de um país (Carvalho, 2008). Apesar de o cimento Portland ser o material de construção com mais uso no mundo, no Brasil sua produção começou a cerca de 75 anos (ABCP, 2002).

Segundo Grande (2003), o cimento é um aglomerante hidráulico preparado pela moagem do clínquer com adição de gesso e outras substâncias que, ao serem adicionadas, determinam o tipo de cimento produzido. O gesso incorporado controla o tempo inicial de hidratação do cimento e o clínquer é um ligante hidráulico muito resistente (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Clínquer na sua forma original. Disponível em <https://ecivilufes.wordpress.com/2013/06/05/revolucao-na-fabricacao-do-cimento/>

O principal componente presente em qualquer tipo de cimento Portland produzido é o clínquer (Tabela 2.2). Ele é obtido após o processo de clínquerização sofrido pela mistura de calcário, argila e uma pequena quantidade de minério de ferro.

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

Óxido	Teor (%)
CaO	60 – 70
SiO₂	17 – 25
Al₂O₃	3 – 8
Fe₂O₃	0,50 – 0,60
MgO	0,50 – 4,00
Álcalis	0,30 – 1,20
SO₃	2,00 – 3,50

O clínquer é composto por vários compostos anidros como a alita (silicato tricálcico-C₃S), belita (silicato dicálcico-C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferrita (ferroaluminato tetracálcico-C₄AF). A principal diferença entre eles é que a Alita desenvolve resistência nos períodos iniciais; a Belita proporciona resistência em idades mais avançadas; as reações do Aluminato Tricálcico ocorrem nos primeiros minutos e a Ferrita apresenta uma resistência mecânica desenvolvida por um processo lento além de apresentar boa resistência aos sulfatos, afirma Grande (2003).

As adições feitas ao cimento são de gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos, como demonstrado no organograma da Figura 2.4. Elas são adicionadas ao clínquer durante o processo de moagem e contribuem para a fabricação dos múltiplos tipos de cimento produzidos atualmente. O gesso controla o tempo de endurecimento do clínquer quando é adicionada água, por isso ele está presente em todos os cimentos. Sem a sua adição o cimento endureceria praticamente no mesmo instante que é usado. As escórias de alto-forno assemelham-se aos grãos de areia e são resultantes da produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas. Elas apresentam propriedade de ligante hidráulico muito resistente e proporcionam maior durabilidade e resistência final. Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas e outros materiais, com propriedade de ligante hidráulico quando pulverizados em partículas muito finas e ligados a outros materiais como o clínquer e por fim, as rochas moídas que apresentam carbonato de cálcio em sua formulação como o calcário, e que representa os materiais carbonáticos responsáveis por tornar o cimento mais trabalhável, funcionando como um bom lubrificante (ABCP, 2002; Carvalho, 2008).

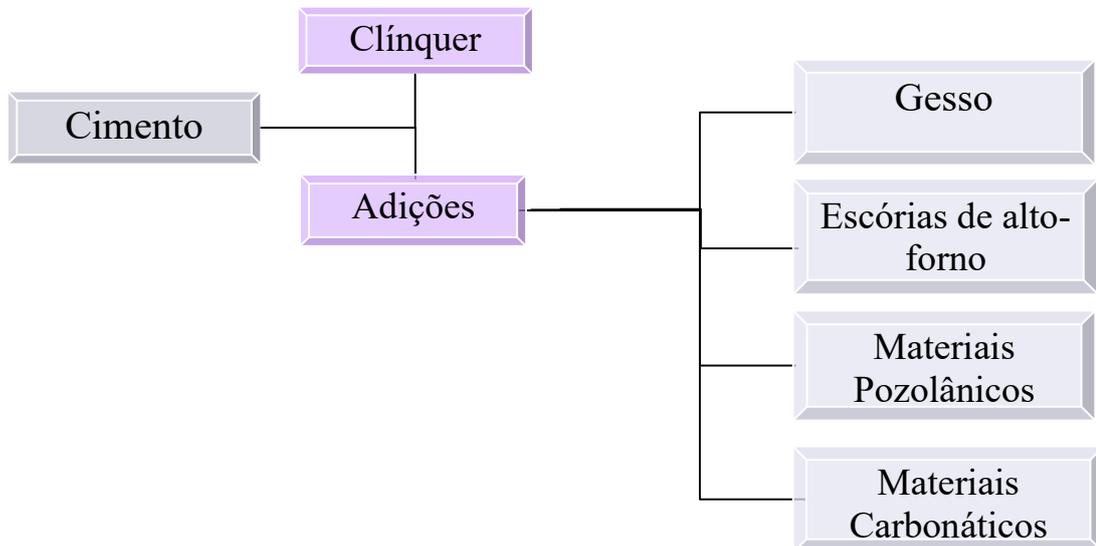


Figura 2.4 – Composição do cimento Portland com suas possíveis adições (ABCP, 2002).

A mais de 50 anos as indústrias brasileiras de cimento utilizam matérias primas alternativas e outros subprodutos adicionados ao clínquer, se destacando em relação ao cenário mundial. Essas adições contribuem com a redução de emissões de CO₂, o aumento de aplicações e características específicas do cimento e uma

alternativa ambientalmente correta para reutilização de escórias siderúrgicas e cinzas de termelétricas (ABCP, 2014).

No Brasil existem diversos tipos de cimento classificados pela Associação Brasileira de Cimento Portland. Eles são nomeados pela sigla CP seguidos de um número romano de I a V de acordo com sua composição. Pode também ser adicionada na sua classificação a resistência mínima à compressão em MPa por valores iguais a 25, 32 e 40 alcançado após um período de cura de 28 dias. A Tabela 2.3 relaciona as nomenclaturas dos cimentos mais comuns e a Tabela 2.4 apresenta a composição química da escória de alto forno presente, em grande maioria, no Cimento Portland III – 40 RS utilizado nesse trabalho.

Tabela 2.3 – Classificação e composição do Cimento Portland (ABCP, 2002).

<i>Sigla</i>	<i>Composição (%)</i>				<i>Norma da ABNT</i>
	Clínquer + gesso	Escória de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático	
CP I	100		-		NBR 5732
CP I – S	95-99		1,5		NBR 5732
CP II – E	56-94	6-34	-	0-10	NBR 11578
CP II – Z	76-94	-	6-14	0-10	NBR 11578
CP II – F	90-94	-	-	6-10	NBR 11578
CP III	25-65	35-70	-	0-5	NBR 5735
CP IV	45-85	-	15-50	0-5	NBR 5736
CP V – ARI	95-100	-	-	0-5	NBR 5733

Tabela 2.4 – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CPIII-40RS (Pinto, 2010).

Óxido	Teor (%)
CaO	41,60
SiO₂	33,65
Al₂O₃	12,42
MgO	7,95
TiO	0,73
FeO	0,45

Outros tipos de cimento também são fabricados em menor escala por apresentarem menor procura e um consumo mais específico. Estes são classificados em Cimento Portland resistentes ao sulfato, Cimento Portland de baixo calor de hidratação, Cimento Portland branco (estrutural e não estrutural) e Cimento para poços petrolíferos especificados nas normas NBR 5737, NBR 13116, NBR 12989 e NBR 9831, respectivamente (ABCP, 2002).

O consumo de cimento continua a crescer a cada ano e somente a quarta parte dele vem sendo destinada a infraestrutura do país, segundo pesquisa realizada pela Fundação Getúlio Vargas (SNIC, 2014). A necessidade de construções de rodovias, pontes, portos, aeroportos, rede de saneamento e abastecimento de água, só para citar alguns exemplos, cria um enorme potencial. O consumo aparente de cimento apresentou um crescimento de 2,4% em 2013, totalizando 71,0 milhões de toneladas consumidas em todo o território nacional. Isso significou um consumo per capita de 353 kg/hab/ano. O Brasil se destaca no cenário mundial como o 6º maior produtor de cimento no ano de 2012 e o 4º maior consumidor de cimento nos anos de 2012 e 2013 de acordo com o balanço do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2014) e da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2014).

As modernas e eficientes indústrias brasileiras de cimento tem se destacado no baixo consumo de energia e, por isso, menor emissão de CO₂ em relação a outros países. A eficiência energética, os combustíveis alternativos e as adições ao clínquer são as três ações dessas indústrias que tem ajudado na diminuição de emissões dos gases de efeito estufa. No Brasil, em 2010, 99 % da produção de cimento foi feita por um processo conhecido como via seca, o mais eficiente dos processos e com menor gasto energético. Em 2011, o Brasil liderou o ranque do país que mais utiliza biomassa na produção do cimento (cerca de 12 %) deixando países como Japão, Índia, China e países da Europa e da América do Norte para trás. E com o aumento dos percentuais de adições ao cimento, o Brasil apresenta a menor relação de clínquer por cimento e se tornou o país de referência nas pesquisas de menor emissão de gás estufa (ABCP, 2014).

2.1.3 - Água

A norma Brasileira NBR 10833 (2012) denominada *Fabricação de tijolo e bloco de solo com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento* propõe a utilização de água sem impurezas que possam prejudicar o processo de hidratação do cimento.

Na mistura de solo-cimento a água é utilizada em pequenas proporções, porém ela é fundamental. Seu objetivo é atribuir plasticidade e resistência mecânica suficiente ao solo para tornar possível a conformação e manuseio da mistura, antes do seu endurecimento (Silva, 2005).

Durante o processo de fabricação do tijolo solo-cimento não é gerado nenhum resíduo líquido que possa contaminar o meio ambiente como os rios, por isso este produto está de acordo com a crescente preocupação de preservação ambiental, afirma Taveira (1987).

2.2 - Tijolo solo-cimento

O solo-cimento é uma mistura homogênea de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas que sofrem compactação e cura. O solo está presente na mistura em maior percentual enquanto a parte de cimento é em torno de 5 a 10 %. Mas nem todos os solos são ideais para comporem a mistura de solo-cimento; o solo recomendado deve ser mais argiloso e apresentar uma curva granulométrica bem distribuída, sem apresentar matéria orgânica e argilo-minerais como a montmorilonita (CEBRACE, 1981; ABCP, 1985).

A ABNT define solo-cimento como o produto endurecido resultante do processo de cura da união de solo, água e cimento compactados em proporções preestabelecidas conforme a NBR 12253 (2012) e executados de acordo com os procedimentos enunciados na NBR 12254 (2013). É um produto conhecido por apresentar boas características como: resistência à compressão, durabilidade e impermeabilidade (Ribeiro e Holanda, 2014; Pinheiro e Soares, 2010; Vieira et al., 2007), bem como baixa retração volumétrica, quando submetido à cura adequada.

Há milhares de anos os romanos acrescentaram cal ao solo para utilizar em suas construções e na Mesopotâmia confeccionaram tijolos com solo de cinzas vulcânicas e cal. Muitas obras resistiram ao tempo e as condições climáticas e são

visitadas até hoje como a Muralha da China, a pirâmide de Uxmal e a igreja de Santa Rita em Parati-RJ, entre muitas outras construções (Rodrigues, 2008).

Após o solo-cinza sofrer modificações criou então o solo-cimento. No final do século XIX, o inglês H. E. Brook Bradley foi o primeiro a utilizar a mistura de solo-cimento no tratamento de leitos de estradas e pistas para veículos de tração animal na região do sul da Inglaterra, comenta Pessoa (2004).

No Brasil as pesquisas com solo-cimento se destacaram após a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) regulamentar a sua aplicação a partir de 1930. Em 1948, a ABCP recomendou o uso do solo-cimento em paredes monolíticas quando publicou o boletim N° 54 – Casa de Paredes de solo-cimento – e por isso, o primeiro registro oficial do emprego do solo-cimento em construções no Brasil foi em 1948, na construção da sede da “Fazenda Inglesa” na cidade de Petrópolis-RJ (Cabala, 2007). Neste mesmo ano foi construído também em Manaus o Hospital Adriano Jorge com paredes monolíticas de solo-cimento, com o apoio da ABNT. Em 1978 aproximadamente, o solo-cimento foi empregado em maior escala em construções de casa para moradias, após a aprovação de técnicas de construções de habitações populares pelo então Banco Nacional de Habitação (BNH).

A principal aplicação dos tijolos é na construção de moradias, mas ele tem se destacado também na construção de camas, mesas, prateleiras, aparadores, bancos e armários por proporcionar uma vida útil maior dos móveis, redução de custos e aparência colonial. Pisos, passeios e jardins também são construídos utilizando essa tecnologia (Pisani, 2005).

2.3 – Formas e dimensões dos tijolos solo-cimento

Diversas variedades de tijolo solo-cimento estão sendo fabricadas no Brasil para atender as necessidades de cada obra. Abaixo são apresentados alguns modelos comercializados no Brasil.

a) Tijolo solo-cimento de encaixe nas quatro faces (Figura 2.5)

São encaixados pelo sistema macho versus fêmea que contribui para aumentar a resistência da parede, facilitar a sua colocação e diminuir o tempo de execução da obra.



Figura 2.5 – Tijolo solo-cimento de Encaixe nas Quatro Faces, de Solo-Cimento (www.ecomaquinas.com, 2015).

b) Tijolo solo-cimento trilho (Figura 2.6)



Figura 2.6 – Tijolo solo-cimento trilho (www.ecomaquinas.com, 2015).

c) Tijolo solo-cimento canaleta padrão.

A fabricação de tijolos solo-cimento em forma de “U” contribui para a construção de verga e contra-verga em cima e em baixo de portas e janelas (Figura 2.7). Também é empregado na execução de reforços estruturais ao formar as cintas de amarração ou vigas concretadas e passagem de tubulações horizontais. É possível, por exemplo, percorrer uma fiação, no sentido horizontal do tijolo canaleta, para ligar duas tomadas que ficará na mesma altura da mesma parede, economizando em material elétrico. São produzidos nas seguintes dimensões: 5 x 10 x 20 cm; 7 x 12,5 x 25 cm e 7,5 x 15 x 30 cm.



Figura 2.7 – Tijolo solo-cimento Canaleta Padrão ou “U” (www.ecomaquinas.com, 2015; <http://www.santorin.com.br>, 2015).

d) Tijolo solo-cimento para formar colunas

Esses tijolos contribuem para formas colunas com faces lisas e perfeitas. Os tijolos são colocados com posições alternadas, porém os furos ficam sobrepostos para que seja possível colocar uma vara e concreto para fortalecer a estrutura (Figura 2.8).

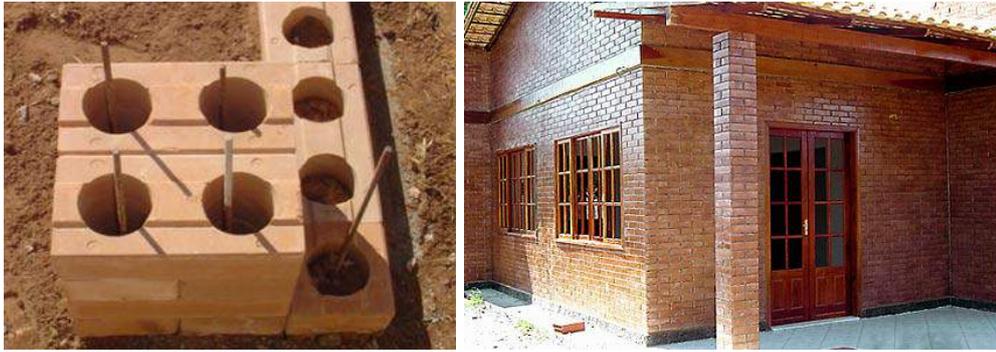


Figura 2.8 – Tijolo solo-cimento formando coluna.

(<http://proyectoprensamanual.webnode.es/>, 2015; paoeecologia.wordpress.com, 2015).

e) Tijolo solo-cimento maciço

Os tijolos maciços de solo-cimento não são muito utilizados na construção de casas já que não possuem os furos que permitem a passagem de fios e canos para a instalação elétrica e hidráulica das alvenarias. É mais comum sua utilização na construção de churrasqueiras, lareiras, fornos, pisos, jardins e outros e são fabricados na dimensão de 5 x 10 x 20 cm (Figura 2.9).



Figura 2.9 – Tijolo maciço de solo-cimento com encaixe e churrasqueira feita de solo cimento. (<http://hidroshow.blogspot.com.br>, 2015).

f) Meio tijolo com encaixe

O tijolo solo-cimento é usado para conectar as juntas e amarrações sem necessidades de quebras. São produzidos com e sem furos com 5 x 10x 10,5 cm de medidas (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Meio Tijolo de solo-cimento com encaixe.

(www.ecomaquinas.com, 2015).

g) Tijolo com dois furos e com encaixe

Os furos são utilizados para passar tubulações das instalações hidráulicas, instalações elétricas e outras. Eles podem ser assentados a seco utilizando somente os encaixes dos mesmos; com cola branca de forma rápida e prática ou com argamassa de assentamento convencional ou feita da mistura de solo, água e cola (Figura 2.11). Esses tijolos podem ser produzidos nas seguintes dimensões: 5 x 10 x 20 cm; 7 x 12 x 25 cm e 7 x 15 x 30 cm.



Figura 2.11 – Tijolo solo-cimento metade e inteiro.

(<http://www.monteirotijolos.com> e <http://hidroshow.blogspot.com.br>, 2015).

Dentre todas as formas de tijolos solo-cimento produzidas no Brasil, o tijolo inteiro com dimensões de 25 x 12,5 x 7 cm é o mais utilizado. Todos os tijolos são aprovados e regulamentados pela ABNT – Associação Brasileira de Normas e

Técnicas (Martins, 2011). As normas referentes ao solo-cimento foram atualizadas recentemente e estão apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Normas em vigor da Associação Brasileira de Normas Técnicas para a produção de solo-cimento. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br>, 2016.

<i>NBR</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>
8491:2012	Tijolo maciço de solo-cimento. Requisitos.
8492:2012	Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.
16096:2012	Solo-cimento: Determinação do grau de pulverização – Método de ensaio.
10833:2012	Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento.
10834:2012	Bloco de solo cimento sem função estrutural – Requisitos.
16097:2012	Solo: Determinação do teor de umidade – Métodos expedidos de ensaio.
10836:2013	Bloco de solo cimento sem função estrutural – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio.
11798:2012	Materiais para base de solo-cimento – Requisitos.
12023:2012	Solo-cimento: Ensaio de compactação.
12024:2012	Solo-cimento: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos – Procedimento.
12025:2012	Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio.
12254:2013	Solo-cimento: Execução de base de solo-cimento – Procedimento.
13554:2012	Solo-cimento: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio.
13555:2012	Solo-cimento – Determinação da absorção de água – Método de ensaio.

O solo é o componente em maior quantidade responsável por 85 % da composição do solo-cimento. Praticamente todos os solos podem ser usados para a confecção de tijolos de solo-cimento apesar de muitos não serem viáveis por ser preciso incorporar uma quantidade maior de cimento, tornando-se economicamente inviável, afirma Lopes (2002) a partir de Alexandre et al. (2006). Água e cimento em proporções adequadas de solo são adicionadas para formar a massa de solo-

cimento. Outros aditivos podem ser incorporados. A mistura é colocada em uma prensa para ser prensada e formar os tijolos. Por fim eles passam por um período de cura de alguns dias, até o tijolo formado adquirir uma boa resistência.

2.4 – Vantagens do solo-cimento

O solo-cimento tem sido muito utilizado na alvenaria para construção de edificações por apresentar muitas vantagens especificadas a seguir, de acordo com Silva (2005), Rodrigues (2008) e Silva (2011):

- A retirada do solo para utilização se realiza em lugares próximos ou no próprio local da obra, reduzindo os custos com extração e transporte do mesmo. Caso o solo não se enquadre no projeto, são permitidas correções na sua granulometria;
- A produção do tijolo não requer mão de obra especializada porque sua tecnologia de construção é simples. Grupos familiares e comunitários podem ser formados reduzindo gastos econômicos e energéticos;
- A alvenaria com tijolos solo-cimento, quando comparada à alvenaria de tijolos cerâmicos, apresenta bom isolamento térmico, pois a “terra crua” é má condutora de calor e de som porque os furos formam bolsões de ar que dificultam a passagem de ondas sonoras.
- As construções com solo-cimento são resistentes ao fogo e mais higiênicas por não oferecerem condições para acomodação e propagação de insetos nocivos à saúde;
- Muito resistentes ao desgaste e à umidade, reduzindo os gastos com manutenção, visto que sua resistência é alta e apresenta boa impenetrabilidade;
- As peças prensadas apresentam faces lisas que requerem apenas uma pintura simples para aumentar a impermeabilidade da parede e, por conseguinte, não precisa de nenhum revestimento como emboço, por exemplo;
- O gasto com energia é bastante reduzido por não ser necessário queimar as peças produzidas, principalmente quando comparadas ao processo de produção por prensagem manual.

As faces planas e lisas desses tijolos solo-cimento fazem com que o material usado para assentamento (argamassa), tenha uma aplicação de espessura mínima e uniforme (Figura 2.12 e Figura 2.13). Até o acabamento pode ser aplicado no próprio tijolo, seja ele, gesso, cerâmica, textura e até tinta, economizando a aplicação do chapisco, emboço e reboco, dispensando tempo, material e mão-de-obra para os mesmos (Silva, 2005).



Figura 2.12 – Construção com solo-cimento (Maireles, 2014).



Figura 2.13 – Casa construída com solo - cimento na cidade de Cambuquira – MG.
(Disponível em <http://www.cambuquira.net/>, 2014).

Como existe grande variedade de solos, faz-se necessário realizar ensaios de caracterização de solo para preparar uma boa mistura final de solo-cimento. Essa

diversidade de solos torna-se então uma desvantagem na utilização do solo-cimento, afirma Silva (2005).

Lima (2013) apresentou um estudo comparativo entre os gastos financeiros para a construção de uma parede de 2,7 m de altura por 3,0 m de comprimento utilizando tijolo de solo-cimento vazado e tijolo cerâmico. A Tabela 2.6 apresenta os valores obtidos em cada processo.

Tabela 2.6 – Comparativo do valor total de uma alvenaria convencional x alvenaria com tijolo solo-cimento (adaptado Lima, 2013).

	<i>Alvenaria com tijolo convencional</i>		<i>Alvenaria com tijolo solo-cimento</i>	
	<i>11,5 x 24 x 14 cm</i>		<i>12,5 x 25 x 7,5 cm</i>	
1. Parede				
<i>Material</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Preço total</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Preço total</i>
Blocos	235 pç	129,25	360	252,00
Cimento + cal	32 kg	7,60	-	-
Areia	0,13 m ³	9,10	-	-
2. Pilares de 2,90 m dentro dos furos				
Areia + pedra	0,22 m ³	14,26	0,12 m ³	6,60
Cimento + pregos	8,5 kg	4,45	-	-
Tábua + ripa + ferro 4,2 mm	33 m	43,02	-	-
Ferro 8 mm	12 m	16,80	12 m	16,80
Arame amarras	0,25 Kg	1,47	0,25 Kg	1,48
3. Duas canaletas de 0,10 x 0,10 x 3,0 m (cada)				
Areia + pedra	0,04 m ³	2,57	0,04	2,58
Cimento	10,5 kg	3,15	10,5 kg	3,15
Tábua + ripa + ferro 4,2 mm	31,42 m	52,21	-	-
Ferro 8 mm	12 m	16,80	6 m	8,40
Arame amarras	0,05 kg	0,30	0,05 kg	0,30
Pregos	0,5 kg	2,05	-	-
4. Reboco 16,20 m ³				
Areia	0,58 m ³	40,54	-	-
Cimento + cal	105	23,50	-	-
5. Pintura 16,20 m ²				
Massa corrida + selador	4 gl	62,60	-	-
Tinta ou silicone impermeável	1 gl	26,90	1 gl	40,00
-	Custo total	R\$ 456,57	Custo total	R\$ 332,57

Percebe-se que a alvenaria com solo-cimento teve um custo 27 % menor comparado com a construção com alvenaria convencional. Essa diferença pode ser explicada pela economia com chapisco, emboço e reboco no revestimento interior, na diminuição da quantidade de argamassa para assentamento, na ausência de recortes nas paredes para instalações elétricas e hidráulicas e a maior produtividade com os tijolos solo-cimento que podem ser assentados apenas com um filete de cola.

2.5 - Etapas de fabricação do tijolo solo-cimento

No processo de fabricação de tijolos de solo-cimento várias etapas são seguidas, como mostrado na Figura 2.14.

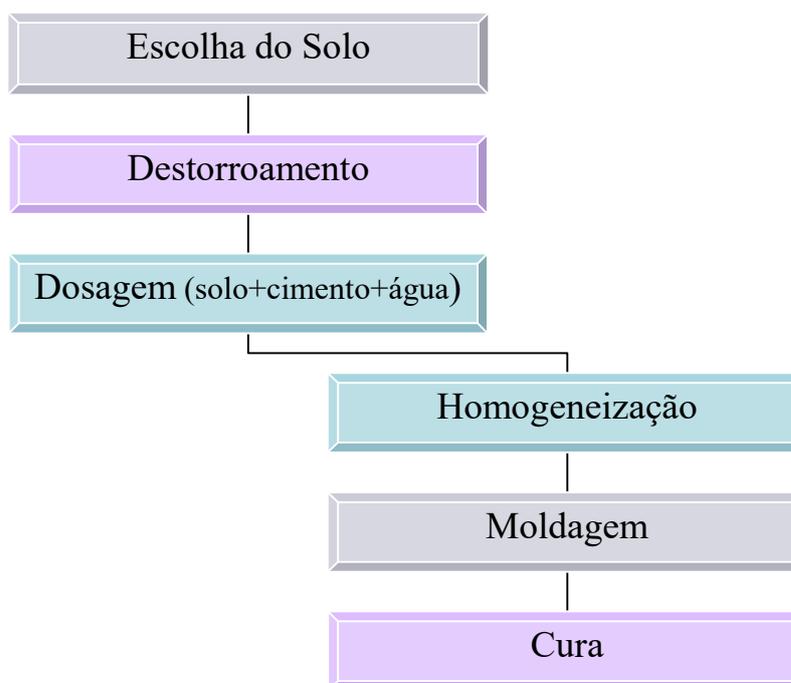


Figura 2.14 – Fluxograma do processo de fabricação de tijolos do tipo solo-cimento (adaptado Pisani, 2007; Pedroti, et al. 2007).

Um dos processos mais importantes na produção dos tijolos solo-cimento é a escolha do solo, pois ele é o componente adicionado em maior quantidade na mistura. Recomenda-se o uso de solos mais arenosos por utilizarem um menor consumo de cimento quando comparado com os solos argilosos. É possível também fazer uma mistura de alguns tipos de solos para atingir propriedades mais adequadas para a mistura de solo-cimento.

O solo mais indicado deve possuir entre 45 % e 50 % de areia e um teor de matéria orgânica baixo que não seja capaz de prejudicar as características exigidas pela norma NBR 10834 da ABNT (1994).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas define os parâmetros necessários do solo para a produção de tijolos maciços de solo-cimento em suas normas NBR 10832 e NBR 10833 resumidas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Características do solo para a fabricação de tijolos de solo-cimento (ABNT, 2012).

<i>Característica</i>	<i>Requisito (%)</i>
% de solo que passa na peneira ABNT 4,75 mm (Nº 4)	100
% de solo que passa na peneira ABNT 0,075 mm (Nº 200)	10 – 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de Plasticidade	≤ 18

Para a preparação do solo são feitos o seu destorroamento e peneiramento. Em seguida, cimento é adicionado ao solo e são promovidas a mistura e homogeneização dos produtos secos. O cimento deve ser adicionado ao solo seco e misturado até que se consiga coloração uniforme (CEBRACE, 1981). Propriedades mecânicas do tijolo de solo-cimento são proporcionais ao teor de cimento da mistura. Frequentemente são acrescentados teores de cimento próximos a 8 % em relação ao peso do solo-seco (Silva, 2005). De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (1986), a mistura de solo, cimento e água devem conter entre 5 % a 10 % de cimento no solo para que o mesmo seja estabilizado e ganhe resistência. O percentual de cimento poderá ser consideravelmente reduzido pela utilização de cimento mais fino que o convencional. Exemplo disso é que 10% em peso de cimento convencional (superfície específica = 2900 cm²/g) apresentam os mesmos resultados que 7 % de cimento de maior finura (superfície específica = 5800 cm²/g) (Silva, 2005).

Uma boa homogeneização da mistura é fundamental. Após adquirir uma massa bem homogeneizada feita com o solo e cimento nas proporções adequadas é adicionado o último componente, a água. Novamente a mistura sofre uma

homogeneização para que toda a massa adquira a mesma umidade, encerrando assim o processo de preparo da mistura (Silva, 2011).

A moldagem dos tijolos pode ser feita em prensas mecânicas: manuais ou automáticas, como na Figura 2.15.

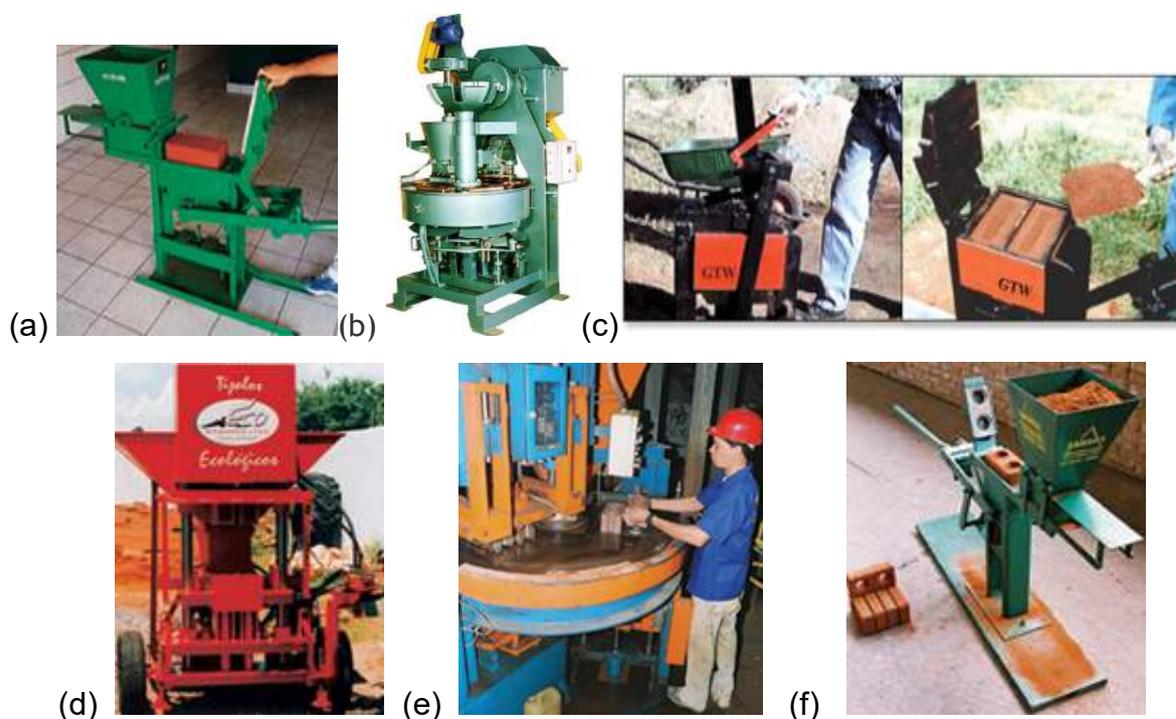


Figura 2.15 – Prensas disponíveis no mercado para a produção de tijolos solo-cimento. (a) Prensa manual Permaq MTS-010, capaz de produzir até 2 mil tijolos/dia. (b) Prensa com alimentação automática Man P6, produz de 800 a 1200 peças/h. (c) Prensa manual da empresa Gutward. (d) Prensa hidráulica sobre duas rodas da empresa Eco-Máquinas, pode produzir 3500 tijolos/dia. (e) Prensa automática da Andrade Gutierrez. (f) Prensa manual da Sahara que produz de 100 a 300 peças por hora (Figuerola, 2004; Destefani, 2009).

Na produção de tijolos de solo-cimento, o equipamento utilizado para moldar a peça é fundamental, pois é no processo de prensagem que ocorre o empacotamento dos grãos de solo, resultando em um produto de baixa porosidade e alta densidade (Faria, 1990); (Silva, 2011). Por isso, novas tecnologias têm surgido possibilitando a construção de novos projetos, que se destacam ao produzir produtos de maior qualidade em resistência mecânica e estética, além do uso do material em obras para famílias de baixo e médio padrão financeiro (Lima, 2013).

Vitali (2008) ao estudar o efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e resistência verificou que a resistência à compressão uniaxial aumenta exponencialmente com a diminuição da porosidade. Foi concluído também que: quanto menor a porosidade, mais eficaz será a cimentação do solo-cimento; a resistência à compressão uniaxial aumenta expressivamente com a adição de pequenas quantidades de cimento e que o cimento promove ganhos de resistência à tração igual aos de resistência à compressão uniaxial.

Durante a cura, os tijolos precisam ser molhados pelo período de sete dias para que os mesmos se conservem úmidos e sem trincas (Silva, 2005). Levy & Helene (1996) afirmam que o processo de cura do tijolo de solo-cimento tem por objetivos: evitar que a água de amassamento e hidratação do cimento, localizada na superfície do tijolo, se dissipe; manter um controle da temperatura do material até que o mesmo obtenha o nível de resistência almejado e fornecer mais água durante as reações de hidratação, quando necessário.

A Figura 2.16 mostra a importância do processo de cura para o ganho de resistência dos corpos de prova. Existe uma redução de até 40 % na resistência de uma peça quando o processo de cura tem secagem rápida. A formação de trincas é um dos resultados desta secagem rápida e pode acontecer também um “esfarelamento” superficial das peças de solo cimento tornando-a mais frágil a ação de chuvas e ventos (Silva, 2005; apud CEPED, 1999).

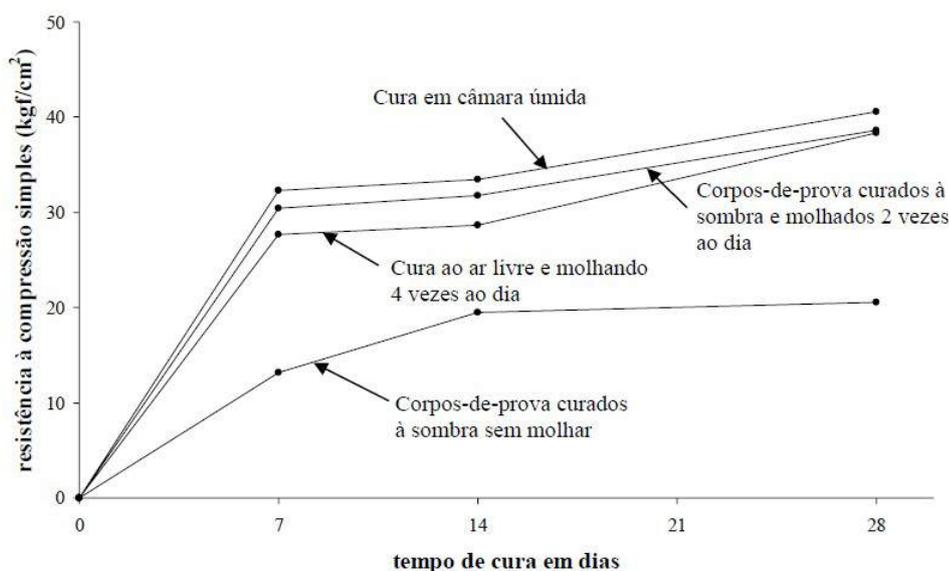


Figura 2.16 – Importância do tipo de cura na resistência à compressão (Silva, 2005; apud CEPED, 1999).

A resistência do tijolo cresce de forma proporcional ao teor de cimento utilizado; porém, deve-se limitar a um teor ideal que confira ao tijolo ou bloco curado a resistência requerida, sem elevação desnecessária do custo do produto final (ABCP, 1985).

2.5 – Resíduo sólido

A Associação Brasileira de Normas e Técnica (ABNT) em sua norma NBR - 10004 de 2004 define resíduo sólido como o material no estado semi-sólido ou sólido resultante das áreas das indústrias, de hospitais, de comércios e outras e acrescentam também nessa denominação alguns líquidos específicos que não devem ser lançados em esgotos ou corpos de água.

2.5.1 – Classificação dos resíduos sólidos

Um resíduo pode ser classificado quanto à sua fonte de geração, ao local de produção, aos aspectos sanitários, econômicos e de incineração, ao grau de biodegradabilidade, a combustibilidade, entre outras características (Silva, 2013).

Segundo a Norma NBR 10004 (2004), a identificação do processo ou atividade que deu origem aos resíduos sólidos, os seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido, são fundamentais para a sua classificação.

A primeira classificação dos resíduos sólidos de acordo com a Norma NBR 10004 é referente quanto ao risco que o resíduo causa à saúde pública e ao meio ambiente sendo assim divididos em resíduos *perigosos* e *não perigosos*. Este último grupo é subdividido em não inerte e inerte como apresentado na Figura 2.17 abaixo.

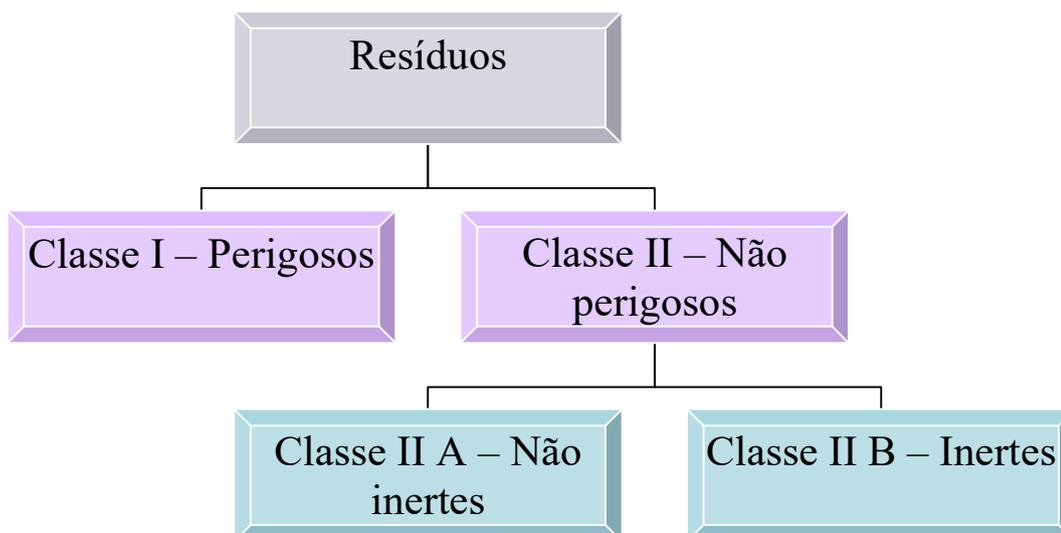


Figura 2.17 – Classificação de resíduos sólidos segundo a ABNT 10004 (2004).

- **Resíduos Classe I – Perigosos:** São os resíduos classificados em inflamável, corrosivo, reativo ou patogênico.
- **Resíduos Classe II – Não Perigosos:** Demais resíduos sólidos divididos em Não Inertes (Classe II A) e Inertes (Classe II B).

Os resíduos da classe II A – Não inertes apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e não se enquadram nas demais classificações de resíduos da Norma 10004.

Os resíduos classe II B – Inertes são assim classificados porque não apresentam constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se o aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente.

2.6 – Biomassa

Segundo Suani Coelho apud. Trigueiro (2014) o termo biomassa aplica-se ao material biológico originário de seres vivos que podem produzir energia, como: bagaço de cana de açúcar, madeira, palha, casca de arroz, milho, capim, algas e capim elefante. Produtos e resíduos da agricultura e da floresta e a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos também são considerados biomassa.

Gerada por processos naturais e antropogênicos, a biomassa compreende: (1) constituintes naturais originados do crescimento vegetal através da fotossíntese ou por via animal e humana, através da digestão de alimentos; (2) produtos gerados por ação antrópica a partir do processamento de constituintes naturais (Vassilev et al, 2010).

Muitas pesquisas atuais se dedicam ao estudo da biomassa como fonte de produção de energia limpa capaz de substituir o petróleo como combustível. Por suas características, a biomassa tem um vasto campo de empregabilidade como no setor agroindustrial, zootécnico e de produção de energia alternativa (Silva, 2013).

A biomassa é um recurso amplamente disponível em todo o mundo e uma importante fonte de energia renovável na maioria dos países. Ela pode converter a energia solar em energia química, que é armazenada na forma biológica através da fotossíntese (Roy e Corscadden, 2012).

A bioenergia fornece quase 15% do consumo total do mundo e é a quarta maior fonte depois do petróleo, carvão e gás natural. Ela é a única forma de energia renovável que pode ser recolhida, armazenada e transportada, e é a mais semelhante às fontes de energia de combustível "convencionais" fósseis (Wang, 2013).

Nos últimos anos, a biomassa tem se tornado cada vez mais importante para o aquecimento urbano, geração de energia e para o setor de transportes (Kalt e Kranz, 2011). A biomassa não é apenas uma "fonte de energia verde" limpa, mas também é a única fonte de carbono renovável. A biomassa é a única fonte de energia de carbono que pode ser convertida em qualquer forma de combustível, incluindo sólidos, líquidos ou gases (Kambo e Dutra, 2014) os quais desempenham papéis importantes em energia renovável (Wang et al, 2015).

A produção de biomassa a partir da lenha da madeira, usada para a produção de energia, é uma alternativa mais viável aos combustíveis fósseis. A utilização da biomassa beneficia o meio ambiente devido à redução de emissão dos gases poluentes, causadores do efeito estufa, em comparação com os combustíveis fósseis.

A biomassa florestal apresenta características importantes que a destaca entre outras fontes de energia como: a) a variedade de sua origem: florestas convencionais, florestas energéticas, resíduos florestais, resíduos industriais e resíduos urbanos; b) balanço energético neutro em relação à emissão e geração de

gás carbônico; c) tecnologia avançada de conversão em energia com grande eficiência e d) proporciona grande potencial de criação de empregos no meio rural (Lopes, 2012).

No Brasil, tem crescido bastante a plantação de florestas energéticas produzidas com um único objetivo: gerar energia. Estas florestas plantadas exclusivamente para uso energético apresentam as vantagens de baixo custo de suas plantações e o grande aumento de instalações de indústrias de celuloses, a principal produtora e consumidora destas florestas, afirma Carmo (2013).

Segundo o levantamento do Ministério de Minas e Energia – MME (2014), a oferta interna de energia em 2013 foi de 41 % provenientes de fontes renováveis na matriz energética brasileira, contra apenas 9,4 % nos países da OECD (Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico), formada na grande maioria por países ricos e, de 13,4 % na média mundial. Deste percentual brasileiro, 28,5 % da oferta interna de energia deriva-se da biomassa, Figura 2.18.

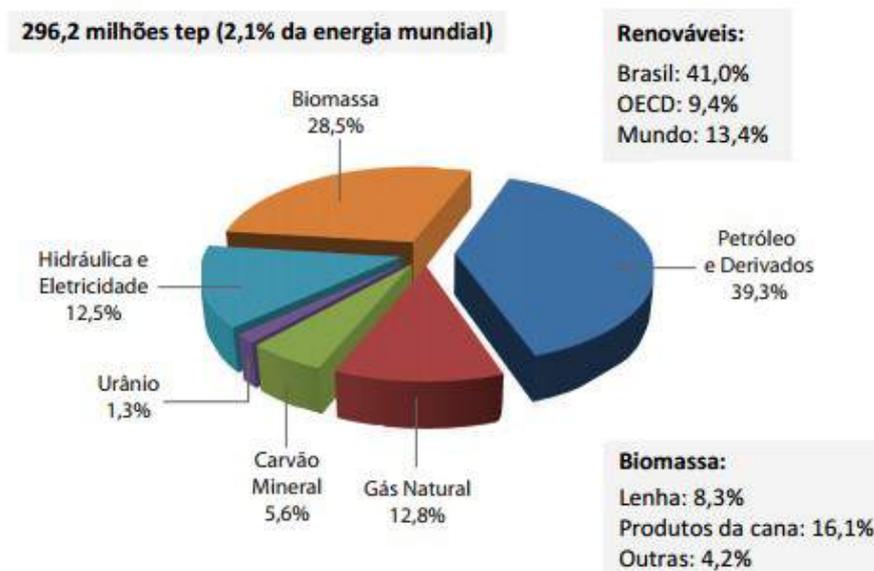


Figura 2.18 – Oferta interna de energia no Brasil em 2013 – OIE (%)
 (Ministério de Minas e Energia, 2014).

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030, a utilização da biomassa ainda não é uma “tecnologia competitiva do ponto de vista comercial”, enfrentando desafios como obtenção de equipamentos adequados à sua transformação em energia. Embora a biomassa seja a segunda maior fonte interna de energia no Brasil, seu consumo final está em último lugar, sendo representado por 4,9% no Estado do Rio de Janeiro (Figura 2.19).

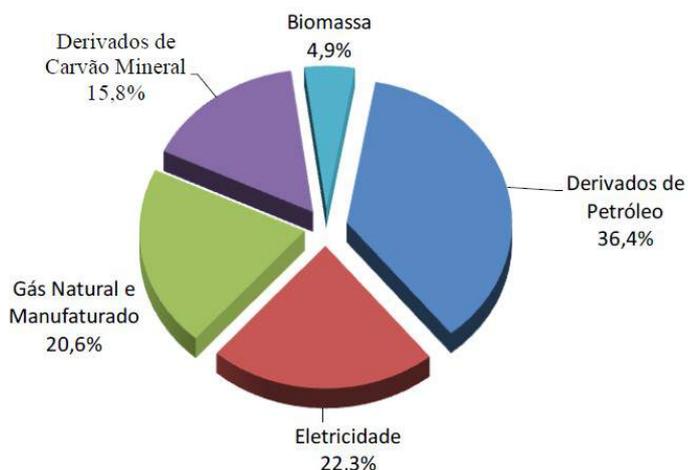


Figura 2.19 – Consumo final de energia do Estado do Rio de Janeiro em 2013 (ADRIO, 2014).

A região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro que abriga uma população de 5,4 % em todo o estado, em 2013, foi responsável pelo consumo de 15,1 % de toda a energia produzida no estado. No que se refere ao consumo por fontes, o gás natural úmido com 46,2 %, a eletricidade com 20,9 %, os derivados de petróleo com 26,4 % e o bagaço de cana com 4,7 %, são as fontes energéticas mais consumidas nesta região (ADRIO, 2014) (Figura 2.20).

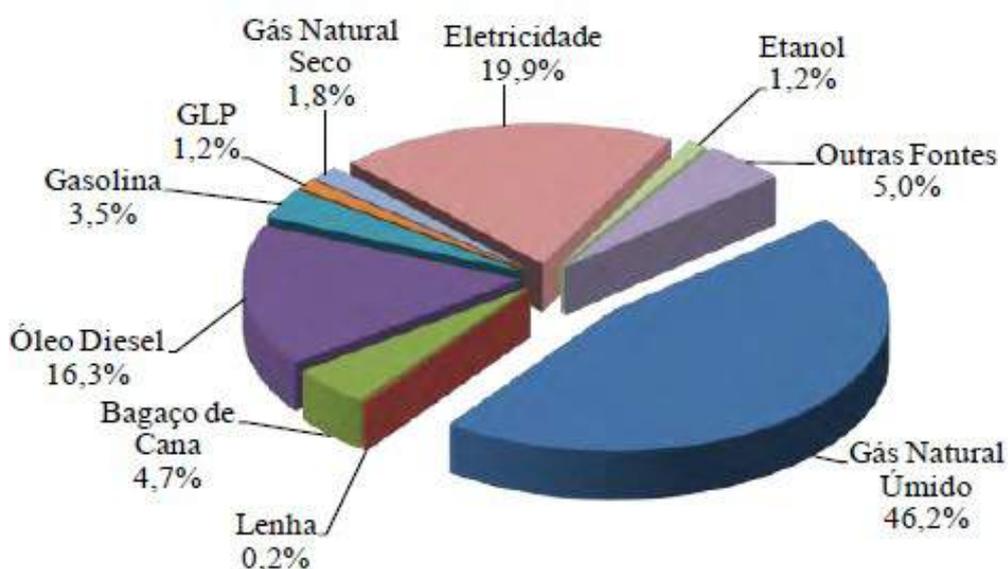


Figura 2.20 – Consumo final de energia por fontes na região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro em 2013 (ADRIO, 2014).

O consumo de lenha (0,2 %) como fonte de energia ainda é bastante tímido na região Norte Fluminense apesar de ser frequente nas inúmeras indústrias de cerâmica vermelha da região.

A Tabela 2.8 demonstra que o principal combustível utilizado nas fornalhas das indústrias cerâmicas do estado do Rio de Janeiro no ano de 2013 é a lenha, com um consumo de 10500 tep (toneladas equivalentes de petróleo), destacando a importância dessas indústrias no consumo de energia renovável.

Tabela 2.8 – Consumo das fontes energéticas utilizadas nas indústrias cerâmicas do estado do Rio de Janeiro no ano de 2013 (ADRIO, 2014).

<i>Fontes energéticas</i>	<i>Consumo (10³ tep)</i>
Carvão energético	0
Lenha	10,5
Óleo diesel	1,5
Óleo combustível	0
GLP	0,5
Gás natural seco	1,4
Eletricidade	5,4
Total	19,2

A produção de energia se divide entre os produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como o petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica, etc. conhecidos como energia primária e os produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação que têm como destino os diversos setores de consumo e, eventualmente, outros centros de transformação são conhecidos como energia secundária. Em 2013, no Estado do Rio de Janeiro, 98,8 % de toda energia produzida foi de energia primária retiradas das jazidas de petróleo e gás natural, importantíssimas para a economia do estado e do Brasil. A produção de energia secundária derivada da energia hidráulica, lenha, caldo/melaço, bagaço, resíduos vegetais e industriais representaram apenas 1,2 % do total (Tabela 2.9). O setor que mais consumiu essa energia produzida foi o de transportes com um percentual de 36,7 % seguido pelo setor industrial com 30,1 % (ADRIO, 2014).

Tabela 2.9 – Produção de energia primária e secundária no estado do Rio de Janeiro no ano de 2013 (ADRIO, 2014).

<i>Fontes energéticas</i>	<i>Produção (10³ tep)</i>	<i>Produção (%)</i>
Petróleo	75282,3	88,2
Gás natural	9935,7	10,6
Energia hidráulica	623,8	0,7
Lenha	139,4	0,2
Caldo/Melaço	50,8	0,0
Bagaço	162,0	0,2
Outras fontes	60,8	0,1
Total	86254,8	100,0

Toda a lenha produzida no Estado do Rio de Janeiro tem procedência de florestas nativas remanescentes e da exploração de florestas plantadas e enfrenta restrições por questões ambientais e pela destruição dos recursos florestais disponíveis. Em 2013, das 126,9 mil toneladas de lenha produzidas no Estado, a maior parte da produção foi direcionada ao consumo, com destaque para o setor residencial (34,0% do total) e para as indústrias de cerâmica vermelha (29,1%) e química (33,3%) e apenas 8,7% foram destinadas às carvoarias para a transformação em carvão vegetal (ADRIO, 2014).

Em um processamento eficiente da biomassa, a energia presente em suas ligações químicas é extraída e combinada com o oxigênio. Este por sua vez, oxida o carbono e produz CO₂ e água. O gás carbônico é então liberado para o ambiente para gerar uma nova biomassa, completando um processo cíclico, afirma McKendry (2002). Apesar de emitir dióxido de carbono (CO₂), a biomassa não pode ser considerada responsável pela poluição da atmosfera, pois, todo CO₂ por ela liberado corresponde ao mesmo valor absorvido pela mesma durante a fotossíntese, comenta Reis e Silveira (2000).

2.6.1 – Utilização de resíduo de madeira em tijolos solo-cimento

Santos (2009) estudou a utilização de resíduos de madeira provenientes da construção civil (RMCC) para a fabricação de solo-cimento. O resíduo, já seco e

triturado, foi coletado na empresa paulista Multilix que atua na área de transbordo, triagem, processamento e comercialização de resíduos da construção civil. Após ser peneirado e sofrer caracterização física, o resíduo foi incorporado nos teores de 1,5; 3,0; 5,0 e 6,5 % na mistura de solo, cimento e água. No ensaio de absorção de água os corpos de prova com 1,5 % e 3 % de resíduo de madeira atingiram valores ideais de acordo com as normas brasileiras. Quanto ao ensaio de resistência à compressão simples, os corpos de prova com teor de 1,5 % de resíduo, apresentaram maior resistência quanto comparada aos resultados dos corpos de prova sem adição do resíduo e dentro das normas. Foi realizado também um ensaio para análise do módulo de elasticidade dinâmico e verificado que à medida que aumentava o teor do resíduo, decrescia o valor do módulo de elasticidade dinâmico, indicando uma pequena possibilidade desse material de adquirir fissuras. Foi concluído que os corpos de prova incorporados com 1,5 % de resíduo de madeira derivados da construção civil podem ser usados na fabricação de tijolo solo-cimento.

2.7 – Cinzas

As indústrias de cerâmica vermelha da região de Campos dos Goytacazes utilizam na sua grande maioria, combustíveis sólidos como a lenha de eucalipto. Com a queima deste combustível é gerada grande quantidade de cinzas como resíduo e que muitas vezes são destinadas de forma inadequada no solo e nos rios poluindo o meio ambiente. Por apresentar metais, o ar poluído com essas cinzas, podem causar danos respiratórios graves no ser humano, comenta Lucena, (2007) aput. Cruz, (2012).

Segundo Silva (2008) na indústria de celulose, a produção de cinzas da biomassa florestal tem ganhado grande destaque entre os resíduos gerados. As cinzas apresentam boas características físicas e químicas e atinge uma produção de 300 toneladas ao mês. Estas cinzas são utilizadas muitas vezes para adicionar nutrientes aos solos de florestas por conter cátions como o K, Ca e Mg e elas contém também em menor quantidade os elementos Cd e Zn afirma Osteras, et al. (2005) aput. Silva, (2008).

2.7.1 – Utilização de cinzas vegetais na cerâmica vermelha

Lima (2008) analisou a viabilidade do uso da cinza da casca da castanha de caju (CCCC) em matrizes cimentícias substituindo partes do cimento Portland pela cinza. Foi analisada a composição química e física da CCCC, sua pozolanicidade, a retração por secagem das argamassas incorporadas com cinzas e a capacidade de estabilização/solidificação do resíduo pela matriz cimentícia. Na análise química foi encontrado alto teor de óxido de magnésio (16,34 %) e de álcalis (Na_2O e K_2O) e baixo teor de sílica (12,17 %), em relação aos teores recomendados para que a cinza apresente reatividade. As cinzas apresentaram aspecto lamelar com camadas sobrepostas e pequenas partículas aderidas à superfície e tamanhos de grãos de 10 a 75 μm , no resultado da análise morfológica. Seu potencial pozolânico foi determinado através de ensaios normativos com a cal e com o cimento Portland, porém os resultados comprovaram que a CCCC não apresentou pozolanicidade. No ensaio de estabilização/solidificação foi apontado que as cinzas liberam Cromo e Sódio mesmo quando estabilizadas em pastas em teores de até 10 % de substituição pelo cimento. Com esses resultados, Lima (2008) concluiu que a cinza da casca da castanha de caju não apresentou viabilidade técnica para uso em matrizes cimentícias.

Paula, et al. (2009) avaliou o potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassa. As argamassas produzidas seguiram o traço de 1:3 de Cimento Portland V e areia e cada parte de cimento foi substituído em 0, 10, 20 e 30 % de CBC. O ensaio de composição química apresentou uma presença considerável de sílica (83,7 %) na fase amorfa e na fase cristalina de cristobalita e quartzo. Após 28 dias de cura, o ensaio de resistência a compressão apresentou valores positivos para a substituição de até 20 % de cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Foi concluído que a substituição do cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar é uma opção viável para a destinação desse resíduo.

Amaral (2014) avaliou a viabilidade de se incorporar o resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial de cimento Portland para a fabricação de tijolos do tipo solo-cimento. Foi utilizado teor de umidade de 16 % e substituição de 0, 10, 20 e 30 % de cimento por cinza para produção dos corpos de

prova que, após serem curados por 28 dias, foram caracterizados em termos de resistência à compressão simples, absorção de água, massa específica aparente, variação dimensional e microestrutura. Foi verificado que o resíduo de cinza do bagaço de cana de açúcar apresenta aproximadamente 50 % de SiO_2 , 10% de CaO , 9 % de Fe_2O_3 e 8 % de Al_2O_3 resultando em uma soma dos percentuais de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ abaixo de 70 % estipulado na norma NBR 12653 (2012) para classificar o resíduo com atividade pozolânica. Segundo o autor todos os corpos de prova analisados adquiriram valores ótimos de absorção de água e resistência à compressão concluindo que o resíduo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizado como substituto de cimento para a fabricação de tijolo solo-cimento.

Hwang e Huynh (2015) estudaram a incorporação de cinza da casca de arroz em tijolos ecológicos. As cinzas estudadas foram da região sul do Vietnã e apresentou densidade de $2,1 \text{ g/cm}^3$ e capacidade de absorção de água de 27,6 %. Foram estudados os traços com 0, 10, 20, 30 e 40 % de cinza da casca de arroz. Após serem prensados e curados por 28 dias, os corpos de prova adquiriram resistência à compressão de 31,5 MPa para o traço sem resíduo, 28,1 MPa com 10 % de resíduo, 24,4 MPa com 20 %, 23,1 MPa com 30 % e 20,9 MPa com 40 % de cinza demonstrando que o aumento do teor do resíduo contribui para a diminuição da resistência à compressão dos corpos de prova. Isso pôde ser explicado pela presença de partículas muito porosas nas cinzas, contribuindo para o aumento do volume dos poros capilares que está relacionado diretamente com a resistência. Apesar da queda dos valores de resistência à compressão, todos os resultados são considerados ótimos, assim como os resultados dos ensaios de resistência à flexão, de acordo com o TCVN 1451:1998 (padrões do Vietnã para construção de tijolo ecológico) e que rege a categoria da mais alta qualidade de tijolos de construção sólida em termos de resistência à compressão e à flexão. No ensaio de absorção de água apenas o corpo de prova com 40 % de resíduo ultrapassou o valor máximo da norma Vietnamita (16 %), atingindo um valor de 17,8 %. Os autores concluíram que os tijolos ecológicos incorporados com até 30 % de cinza da casca de arroz apresentaram os melhores resultados. Além de ser rentável, a utilização desse resíduo na produção do tijolo ecológico contribui para uma destinação mais segura desse resíduo sólido.

2.7.2 – Utilização de cinzas de madeira em materiais de construção

Medeiros, et al. (2010) estudou a incorporação de cinza de lenha (CL), lodo de estação de tratamento de água (LETA) e cinza de casca de arroz (CCA) em massa cerâmica para a produção de blocos. As cinzas da lenha foram coletadas de uma indústria de cerâmica branca da cidade de São Sebastião – DF. Ao analisar quimicamente a CL foi encontrado 43,32 % de CaO, 7,36 % de MgO e 8,24 % K₂O indicando ser uma cinza fundente e formadora de poros para temperaturas superior a 1000 °C. Na análise de difração de raios X verificou-se que a CL é constituída por quartzo (SiO₂), aluminato de magnésio (MgAl₂O₄), feldspato potássico e óxido de cálcio (CaO) e, em relação ao comportamento granulométrico, a CL apresenta 8,44 % de fração argila, 87,49 % de fração silte e 4,04 % de fração areia e com diâmetro médio de 25,62 µm. Foi concluído que na temperatura de 800 °C paa a composição de argila, CL e CCA, o aumento na quantidade de CL pode reduzir a absorção de água e aumentar o módulo de ruptura por flexão.

Vaske (2012) estudou a viabilidade da utilização de cinza coletada em filtro mult ciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular para produção de vapor, visando sua incorporação ao concreto. A cinza utilizada foi coletada no Complexo Hospitalar Santa Casa de Porto Alegre - RS. A lenha utilizada nesse forno era formada por 10 % de *Eucalyptus Citriodora*, 30 % de *Eucalyptus Camaldulensis* e 60 % de *Eucalyptus Saligna*. Eles apresentaram teores de umidade diferenciados e por isso foram queimados entre 800 °C e 1200 °C. Para obter um resíduo mais uniforme, foram coletadas 42 porções de cinzas, uma porção coletada a cada dia. Elas foram secas e homogeneizadas e passaram por processos de caracterização química, física, morfológica, mineralógica e de impacto ambiental.

Foi encontrada grande diversidade de compostos químicos após a caracterização química das cinzas da lenha de eucalipto (Tabela 2.10). Foi verificado um percentual de aproximadamente 50 % de CaO e apresentado perda ao fogo de 25,1 %. Foelkel (2008) relata que todos os minerais que uma árvore recebe durante sua vida são encontrados nas cinzas resultante da queima de madeira.

Tabela 2.10 – Valores percentuais médios (%) dos compostos químicos presentes na cinza (Vaske, 2012).

CaO	K ₂ O	SiO ₂	Cl	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃	SrO	BaO	Na ₂ O	TiO ₂	ZnO	CuO	Br
48,99	6,11	3,45	3,08	2,88	2,04	2,00	1,92	1,67	1,00	0,65	0,41	0,32	0,15	0,07	0,03	0,02

No ensaio das características físicas foram encontrados 10 % de partículas na faixa de 0 – 4,43 µm; 40 % de partículas localizadas na faixa de 4,43 – 24,75 µm e na faixa de 24,75 – 72,04 µm e ainda 10 % de partículas com granulometria acima de 72,04 µm. Apresentou diâmetro médio de 32,59 µm o que a torna capaz de preencher os vazios que podem ser formados no concreto. No ensaio de difração de raios X foram encontrados vários picos de calcita e clorocalcita, Figura 2.21.

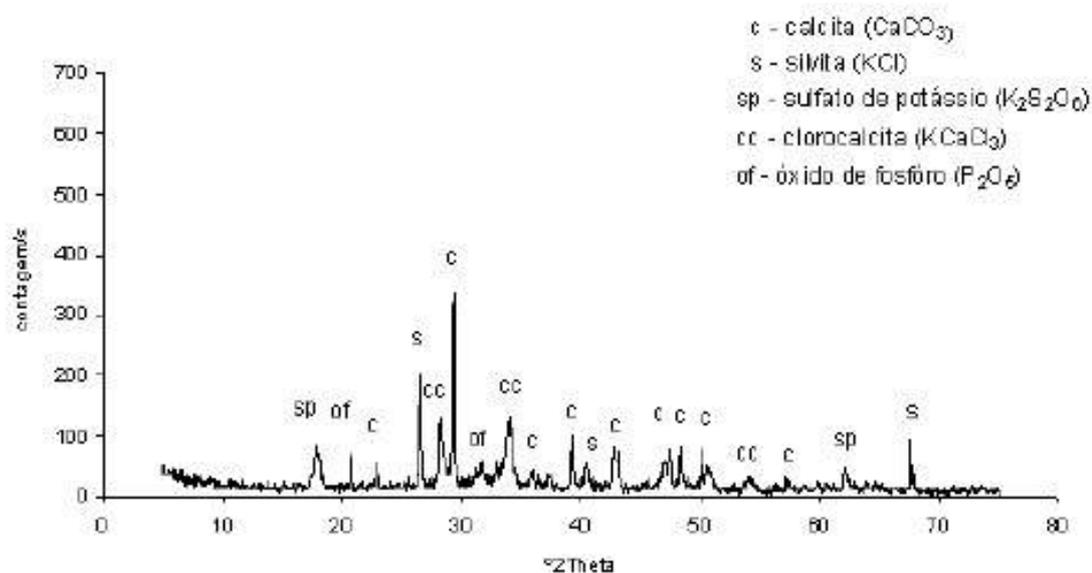


Figura 2.21 – Difratograma de raio X da cinza da queira de tora de eucalipto (Vaske, 2012).

A micrografia obtida por MEV, Figura 2.22, demonstrou que a cinza apresenta grãos lamelares, com baixo grau de esfericidade e estrutura com poros e cavidades, comum também em micrografias de cinza de casca de arroz.

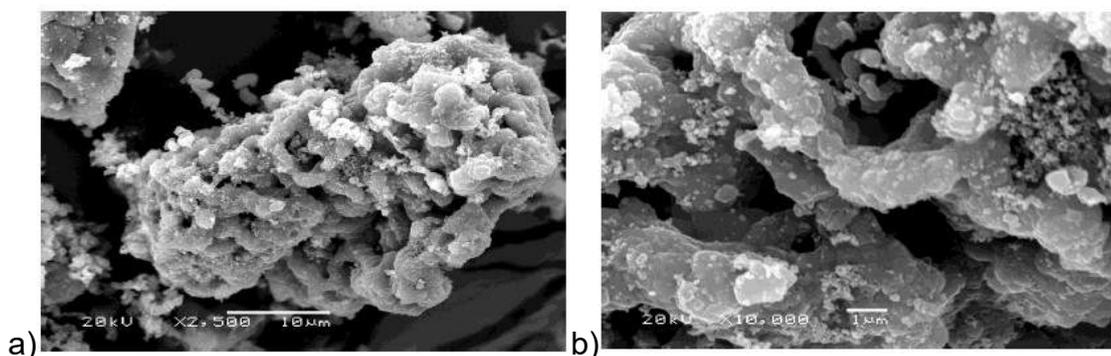


Figura 2.22 – Micrografia eletrônica de varredura da amostra de cinza. a) Ampliada 2500 vezes. b) Ampliada 10000 vezes (Vaske, 2012).

Vaske (2012) utilizou o cimento Portland Pozolânico CP IV – 32 o mais comum em sua região, para fazer pastas de concreto. A pasta de referência apresentava uma relação de água/cimento de 0,304 adicionada ao concreto. Foram produzidas também outras pastas com adição de 15 %, 30 % e 45 % de cinzas em relação à massa de cimento. Foi avaliado o desempenho mecânico e a durabilidade de 3 traços de concreto endurecido e a cada um foram confeccionados corpos de prova com 0, 15, 30 e 45 % de adição de cinzas de lenha de eucalipto. A adição de 45 % de cinzas apresentou resistência à compressão praticamente igual ao traço de referência (0 %) enquanto que os traços de 15 e 30 % apresentaram um aumento significativo de sua resistência. Quanto ao ensaio de absorção de água, verificou uma diminuição com o aumento do teor de cinzas apresentando menor absorção no corpo de prova com teor de 30 % de resíduo, seguido do corpo de prova de 15 %.

Foi concluído por Vaske (2012) que os teores de 15 e 30 % de cinzas adicionadas em pastas de cimento influenciaram positivamente a cinética de hidratação do cimento ao retardar o início das reações, diminuição da temperatura máxima e dissipação de calor de forma menos intensa. O teor de 15 % de cinzas apresentou os melhores resultados de resistência à compressão visto que a cinza atuou como fíler. Ocorreu aumento da absorção de água à medida que aumentou a relação água/cimento nos corpos de prova. Quanto ao aspecto econômico, os teores de 15 e 30 % de cinza apresentaram menor consumo de cimento, contribuindo para uma diminuição do custo de produção do concreto. Ante o exposto, a adição de 15 % de adição de cinza demonstrou ser a melhor alternativa do ponto vista técnico, econômico e ambiental.

Com esses resultados, a cinza da lenha de madeira de eucalipto pode ser utilizada como fíler na adição ao concreto, afirma Vaske (2012).

Gluitz e Marafão (2013) estudaram a utilização da cinza da madeira de eucalipto (CME) na substituição parcial do cimento Portland em argamassa. Foi utilizada a cinza de uma indústria de secagem e armazenamento de grãos de Francisco Beltrão - PR, na preparação de pasta de cimento e água com 5 %, 10 %, 15 % e 20 % de cinzas. Após serem peneiradas e secas, as cinzas passaram por análises químicas e físicas. No ensaio de espectroscopia na região do infravermelho da CME, foi identificado picos de calcita e caulinita. O difratograma de raios X apresentou vários picos intensos de carbonato de cálcio, de hidróxido de cálcio e óxido de silício. Como a cinza se apresentou na fase cristalina e em sua granulometria não se apresentou suficientemente fina para provocar o efeito filler (preenchimento dos vazios), foi concluído que a CME não deve apresentar atividade pozolânica. Foi realizada pelos autores, a confecção de corpos de provas com as CME. Após passarem pelo processo de cura de 3, 7 e 28 dias foram testadas suas resistências à compressão. Os resultados encontrados não foram satisfatórios visto que, todas as adições de cinzas, em todos os períodos de cura, ficaram abaixo do valor de referência. O único corpo de prova que não apresentou uma perda significativa de sua resistência foi a peça com a adição de 5 % de CME curado em 3 dias (Figura 2.23).

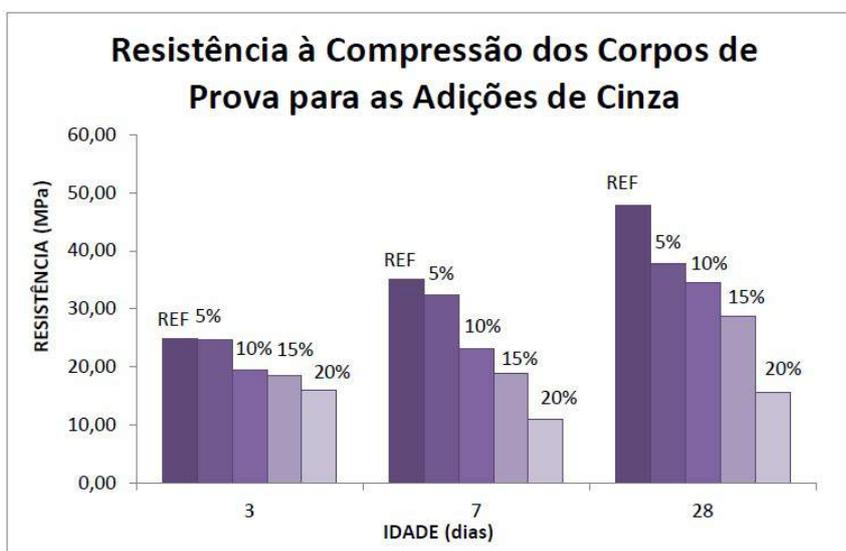


Figura 2.23 – Resistência à compressão dos corpos de provas para as adições de CME (Gluitz e Marafão, 2013).

Foi concluído por Gluitz e Marafão (2013) que: à medida que aumenta o teor de cinzas na mistura, ocorre uma diminuição de silicatos de cálcio hidratados e hidróxido de cálcio responsáveis pela resistência do material; a cinza não

apresentou potencial pozolânico e ela pode ser usada como adição inerte na substituição parcial do cimento portland, visto que não sofrerá transformação química por estar em fase cristalina.

Resende (2013) pesquisou o efeito da incorporação de cinzas de cavaco de lenha de Eucalipto como material cimentício suplementar. As cinzas foram coletadas de uma caldeira alternativa da empresa DPA-Nestlé localizada na cidade de Ibiá-MG que produz mensalmente 29 toneladas de cinzas, aproximadamente uma tonelada por dia. As cinzas estudadas foram divididas em três grupos: cinza in natura (como colhida na caldeira); cinza moída e cinza requeimada em forno por 2 horas na temperatura de 600 °C, Figura 2.24. E em cada grupo, as cinzas foram substituídas em 0, 5, 10 e 15 % em relação ao cimento CP V utilizado.

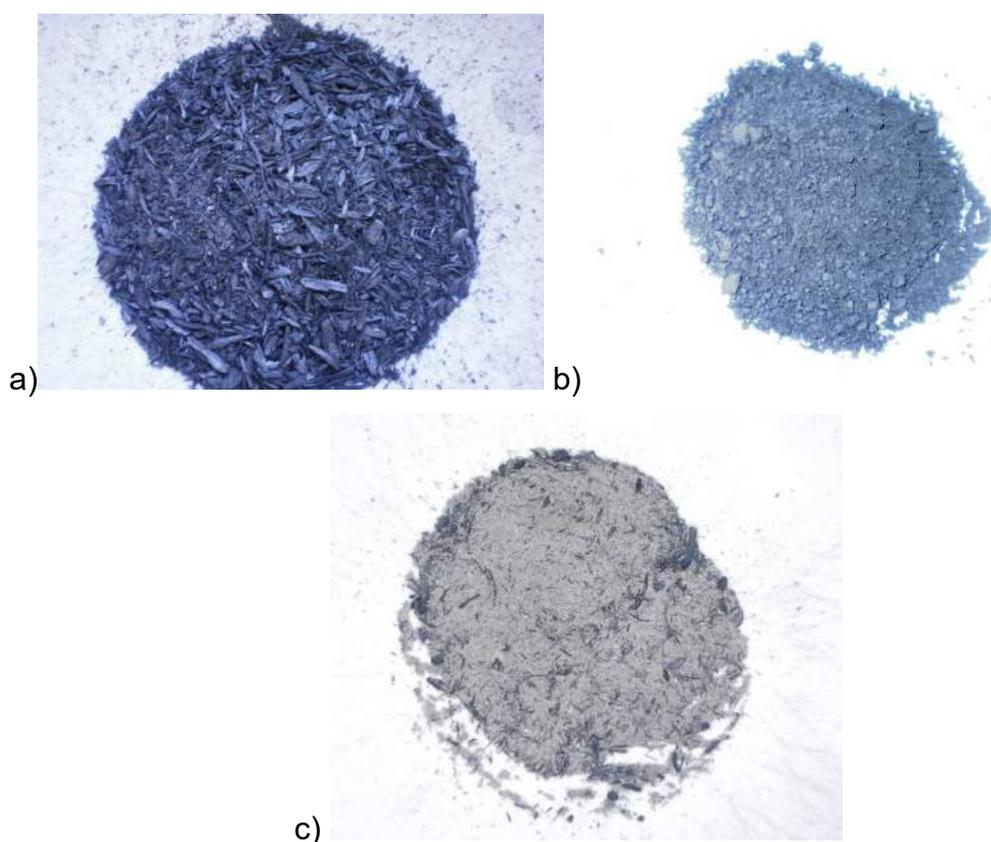


Figura 2.24 – Cinza da lenha de Eucalipto. a) Retirada direto da caldeira; b) Após retirada da caldeira foi moída em moinho de bolas e em c) requeimada (Resende, 2013).

Foram realizados ensaios de espectrometria de raios X dispersivo em energia (EDS) nas cinzas in natura, moídas e requeimadas. Os resultados indicaram baixo teor de matéria orgânica nas cinzas, confirmada pela pequena presença de fibras

longas rugosas escuras que representam o carbono e maior teor de Cálcio (aproximadamente 50 %) e Ferro (aproximadamente 15 %) no ensaio semi quantitativo da composição química via EDS. Figura 2.25.

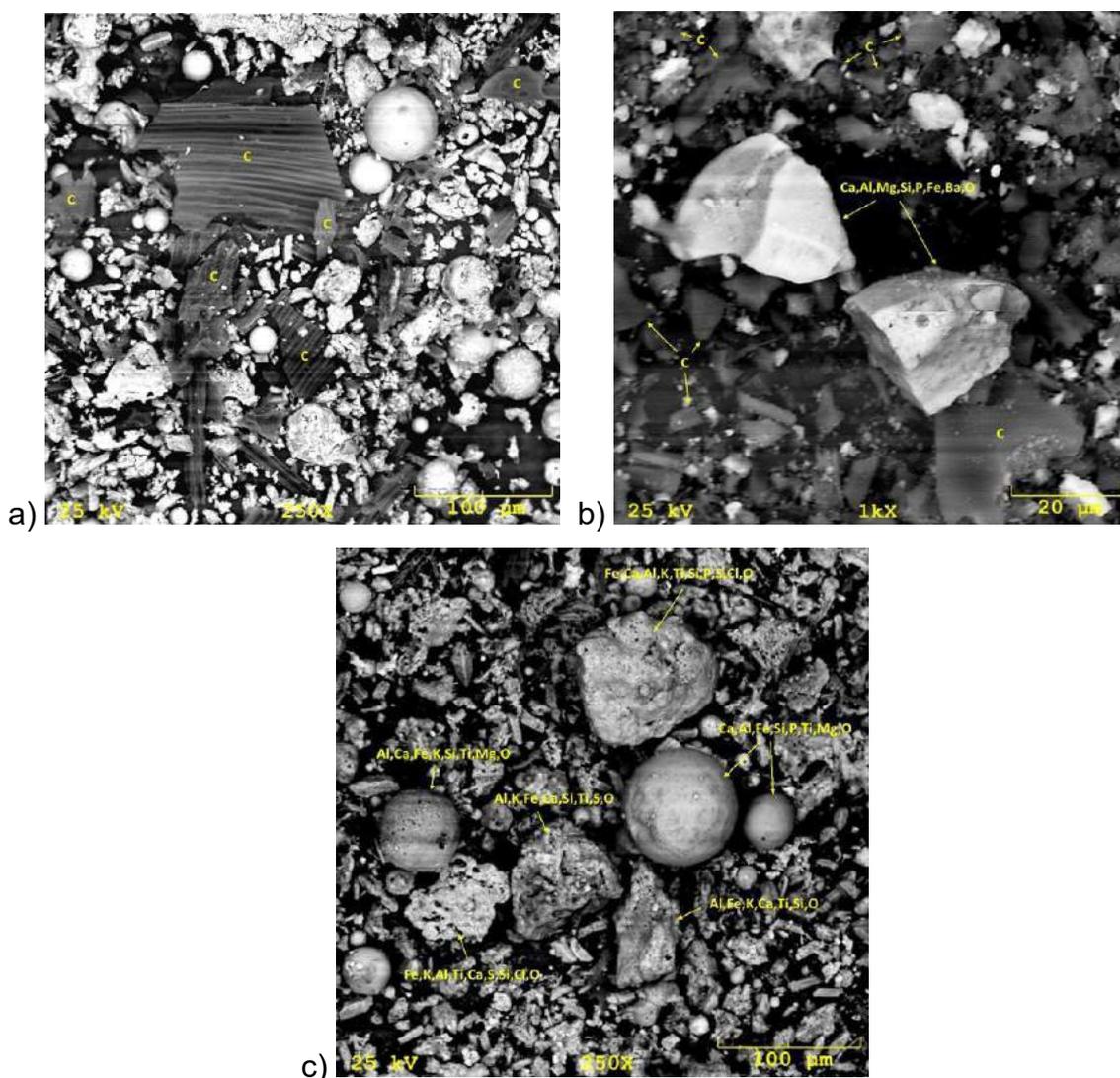


Figura 2.25 – Micrografia obtida por MEV. a) Cinza in natura com aumento de 250x; b) Cinza moída com aumento de 1000x e c) Cinza requemada com aumento de 250x (Resende, 2013).

No ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (EDX) das cinzas de cavaco de eucalipto, foi encontrado maior percentual de óxido de cálcio (27,4 %); óxido de alumínio (22,6 %) e óxido de ferro (10,9 %) indicando que as cinzas possuem baixo teor de sílica e alto teor de cálcio, e valores altos de perda ao fogo para as cinzas in natura e moídas 47,5 % e 51,0 %, respectivamente. Por apresentar menor quantidade de carbono, a cinza requemada apresentou 15 % de perda ao fogo. Os ensaios de comportamento mecânico demonstraram que todas as cinzas

de eucalipto estudadas apresentaram a característica de preenchimentos de vazios e ainda, as cinzas moídas e requeimadas apresentaram uma reatividade que melhorou as propriedades do compósito no estado endurecido. A substituição de 5 % de cimento por cinza de cavaco de eucalipto na produção de concretos não alterou a quantidade de compósito produzido e, portanto, pode ser utilizado como uma boa alternativa de reutilização desse resíduo, concluiu Resende (2013).

Silva, et al. (2015) pesquisou a caracterização de cinzas de biomassa gerada na agroindústria do cacau e sua substituição ao cimento. As cinzas geradas na indústria de processamento do cacau são compostas por 80 % de cinza da madeira de eucalipto e 20 % de cinza da casca de amêndoa de cacau e foram classificadas de acordo com o local onde foram retiradas em: cinza ciclone (CC), coletada nos filtros dos gases e, cinza fornalha (CF) coletada dentro da fornalha. Após serem moídas, as cinzas foram queimadas nas temperaturas de 500, 700 e 900 °C e em seguida classificadas quanto as suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Foram produzidos corpos de prova com traço de uma parte de Cimento Portland II para três partes de areia quartzosa em massa e substituição de 5 % do cimento por cinzas requeimadas e requeimadas e moídas. A cinza apresentou textura rugosa e superfície porosa ao sofrer caracterização morfológica e na classificação química apresentou aproximadamente 35 % de K_2O e 16 % de MgO mas não identificou compostos químicos que admitam o desenvolvimento de atividade pozolânica com os compostos hidratados do cimento. A argamassa incorporada com cinza ciclone moída apresentou maior resistência mecânica em relação à cinza sem moagem devido ao maior empacotamento da mistura. Foi concluído que a mistura de cinza da lenha de eucalipto mais a cinza da casca de amêndoa de cacau pode ser adicionada como elemento inerte em materiais a base de cimento.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados nesta tese de doutorado, que envolve diversas etapas relacionadas às matérias-primas, o processamento e os ensaios que foram utilizados. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma das etapas que foram desenvolvidas neste trabalho.

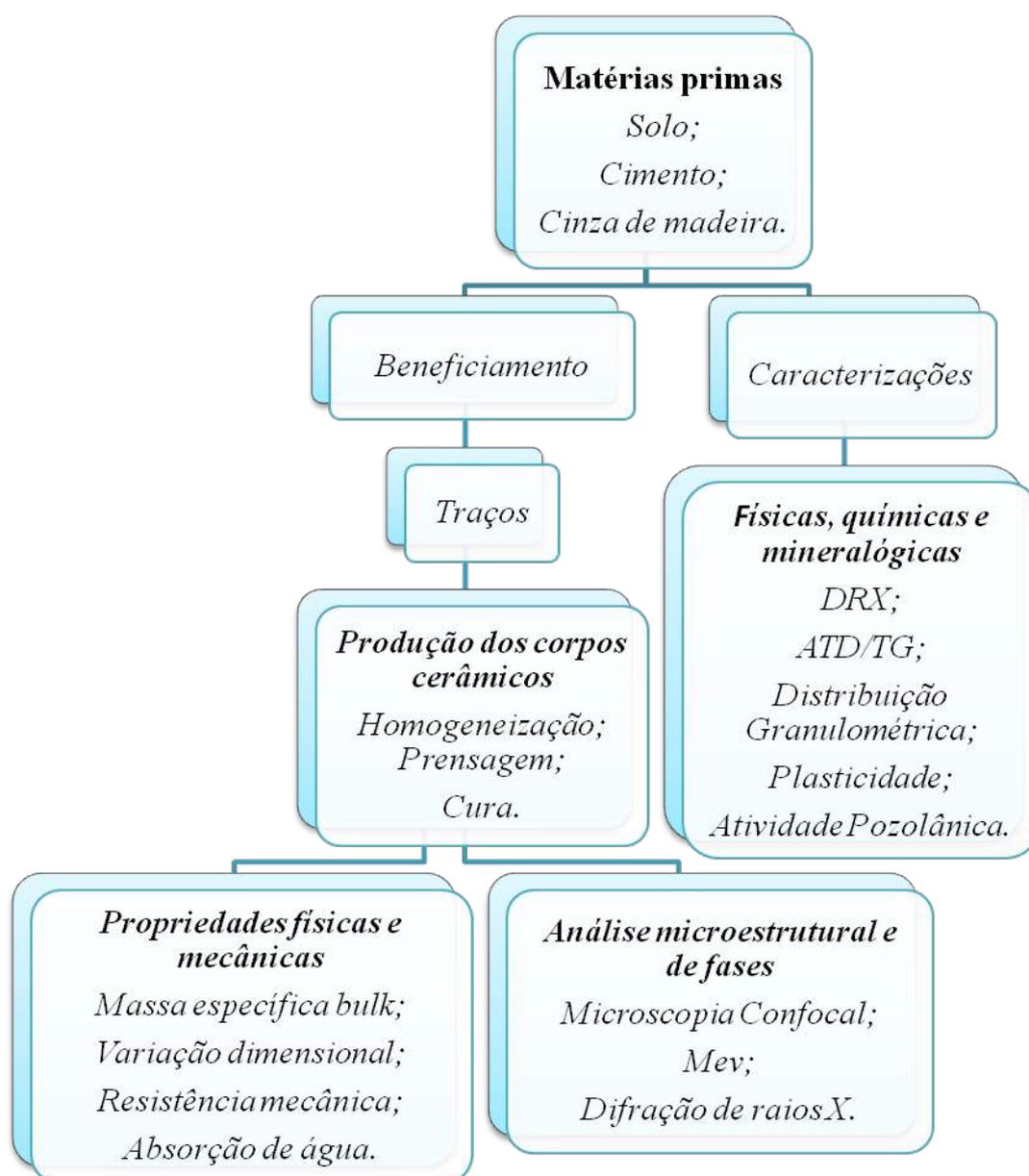


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho.

3.1. Matérias-primas

Neste trabalho foram utilizadas as seguintes matérias-primas: solo arenoso, cimento Portland e resíduo de cinza de madeira. O solo arenoso e o resíduo de cinza foram coletados na empresa de Cerâmica Sardinha localizada no município de Campos dos Goytacazes/RJ. O cimento utilizado foi do tipo cimento Portland CP III-40RS; por apresentar grande facilidade de encontrá-lo na região, por seu baixo custo e de ser o cimento que apresenta maior resistência à compressão dentre os recomendados pela Associação Brasileira de Cimento Portland, através do Guia Básico de utilização do Cimento Portland na produção de tijolo solo-cimento (ABCP, 2002).

3.2. Metodologia

3.2.1. Beneficiamento das matérias-primas

O resíduo de cinza de madeira foi coletado na forma de pó fino. Após coleta, a amostra de cinza foi depositada em recipientes para secagem em estufa de laboratório a 110 °C durante 48 h. O solo também foi seco em estufa de laboratório a 110 °C durante 24 h. Posteriormente, o solo foi desagregado manualmente com graal e pistilo de porcelana até passagem completa em peneira de 4 mesh (4,75 mm ASTM). O resíduo foi desagregado com graal e pistilo até a passagem completa em peneira de 200 mesh (75 µm ASTM). Ao final eles foram colocados em vasilhames fechados para sua posterior utilização, de modo a não absorver umidade do ar.

3.2.2. Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram submetidas à caracterização mineralógica, física e química, utilizando uma série de técnicas de caracterização como: difração de raios X, fluorescência de raios X, análise térmica diferencial, análise termogravimétrica, análise de tamanho de partículas, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia Confocal e plasticidade.

3.2.2.1. Difração de raios X

A análise mineralógica qualitativa dos minerais presentes tanto no solo quanto na cinza da queima de madeira foi realizada através de difração de raios X (DRX). Os experimentos foram realizados em um difratômetro Shimadzu, modelo XRD-7000, utilizando-se radiação monocromática de Cu-K α sob ângulo 2 θ de 5 até 70°, com velocidade de 1,5°/min. A identificação das fases presentes foi feita através da comparação do ângulo de Bragg, da distância interplanar e da intensidade relativa dos principais picos de difração com fichas padrão JCPDS – Joint Comitee of Powder Diffraction Standards. As fichas utilizadas com suas respectivas identificações foram: Caulinita (JCPDS – 29-0306), Quartzo (JCPDS–33-1161), Gibsita (JCPDS–33-0018), Goetita (JCPDS–01-0401), Calcita (JCPDS–01-0837), Belita (JCPDS–32-0149), Etringita (JCPDS–37-1476), Alita (JCPDS–31-0301), Feldspato sódico (JCPDS–10-393), Microclina (JCPDS–19-0926), Hematita (JCPDS–24-0072), Mica (JCPDS–47-0222) e Ilita (JCPDS–24-495), Portlandita (JCPDS–01-1079), Silicato de cálcio hidratado (JCPDS–03-0247).

3.2.2.2. Composição química

Para a identificação dos componentes químicos das amostras foi realizada análises químicas utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X, de energia dispersiva (EDX), da marca e modelo Shimadzu EDX-700, acoplado a um computador para o processamento de dados. A perda ao fogo das matérias-primas foi determinada de acordo com a expressão (3.1):

$$PF(\%) = \frac{(M_s - M_c)}{M_s} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

PF é a perda ao fogo (%);

Ms é a massa da amostra seca a 110 °C em estufa (g);

Mc é a massa da amostra calcinada a 1000 °C por 2 h com uma taxa de aquecimento de 10° C/min em forno mufla, marca Maitec, modelo FL 1300 (g).

3.2.2.3. Análises térmicas (ATD/TG)

As análises térmicas diferenciais (ATD) e termogravimétricas (TG/DTG) foram realizadas em um analisador simultâneo ATG-ATD, marca Shimadzu, modelo DTG-60H. O ensaio foi realizado sob atmosfera de nitrogênio (28° C) até 1000° C, com uma taxa de aquecimento de 10° C/min durante 30 minutos com o objetivo de analisar os picos exotérmicos e endotérmicos produzidos e a variação de massa das matérias primas em função da temperatura.

3.2.2.4. Análise granulométrica

Análises granulométricas das matérias-primas foram determinadas através de procedimentos de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984), pelo processo combinado de sedimentação e peneiramento. A massa específica real dos grãos foi determinada via a técnica de picnometria.

3.2.2.5. Plasticidade

As propriedades plásticas do solo (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) foram determinadas de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado pela expressão (3.2):

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

Onde:

IP – índice de plasticidade (%);

LL – limite de liquidez (%);

LP – limite de plasticidade (%).

O limite de plasticidade (LP) está relacionado à quantidade de água mínima necessária para que o estado de consistência plástico seja adquirido. O limite de liquidez (LL) está relacionado à quantidade de água em que o material apresenta uma consistência de lama, ultrapassando assim, a faixa de consistência plástica. Valores elevados podem conduzir a maiores dificuldades no destorroamento e também no processo de mistura dos componentes. Quanto menor o índice de plasticidade do solo, maior facilidade terá para estabilizá-lo, uma vez que o material estará menos sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo.

3.2.2.6. Atividade pozolânica

O ensaio para a determinação da atividade pozolânica da cinza de madeira foi realizado de acordo com o método proposto por Luxan *et al.* (1989).

Foi utilizado 200 ml de solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 a 40 °C; com adição de 5 g de cinza, mantida em agitador magnético para homogeneização. Após a adição da cinza a variação da condutividade elétrica foi monitorada por um período de 120 s. O índice de atividade pozolânica foi definido como a relação entre a condutividade da solução antes da adição da cinza de madeira e aquela depois da agitação com a cinza.

Sendo assim foi possível classificar o material como:

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

3.2.2.7. Teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH da cinza de madeira

A análise do teor de matéria orgânica, sais solúveis, CTC e pH da amostra de cinza de madeira foi realizada na Fundenor/Departamento de Produção Vegetal segundo a metodologia da Embrapa Solos, onde se seguiu o padrão

descrito no manual de métodos de análise de solos da mesma. A capacidade de troca de cátions (CTC) representa a medida do poder de adsorção e troca de cátions do solo.

A caracterização física do cimento CP III – 40RS utilizado nesse trabalho foi fornecida pelo seu fabricante e está indicada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização física do cimento Portland CP III – 40RS (Amaral, 2016).

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

3.2.3. Preparação dos traços com adição de resíduo sólido de cinza de madeira

Esta etapa consiste na formulação dos traços com incorporação do resíduo de cinza de madeira resultante do processo de queima de cerâmica vermelha. Foi utilizada uma mistura de solo-cimento padrão, sendo 1:10, ou seja, uma parte de cimento para dez partes de solo. A massa foi umedecida com o teor de 16% de água. Para a mistura de referência de solo-cimento foi adicionado o resíduo de cinza de madeira em substituição parcial do cimento Portland nas seguintes quantidades 10%, 20%, 30% e 40% em peso formando

os traços T1, T2, T3 e T4, respectivamente, como apresentado na Tabela 3.2 e o traço de referência (TR) não apresenta resíduo.

Tabela 3.2 – Composição dos traços para corpo de prova unitário.

Traço	Solo (g)	Cimento (g)	Cinza de madeira (g)
TR	90	9,0	0,0
T1	90	8,1	0,9
T2	90	7,2	1,8
T3	90	6,3	2,7
T4	90	5,4	3,6

3.2.4. Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram conformados por prensagem uniaxial em prensa hidráulica (Figura 3.2), com capacidade de 15 toneladas. Foi utilizada uma carga de 2 toneladas para a prensagem de todos os corpos-de-prova e uma umidade de 16 % da massa, a fim de propiciar melhores condições para manuseio, máxima compactação do material, maiores valores de densidade, resistência e durabilidade. A matriz que foi utilizada é de forma cilíndrica com diâmetro de 37,17 mm e os pistões que foram empregados são feito de aço (Figura 3.3).



Figura 3.2 – Prensa hidráulica para fabricação de corpo de prova.

(Rodrigues, 2012).



Figura 3.3 - Matriz cilíndrica para fabricação de corpo de prova.
(Rodrigues, 2012).

3.2.5. Etapa de cura dos corpos-de-prova

Após a prensagem, os corpos-de-prova foram depositados em uma câmara úmida e foram curados durante 28 dias para realização dos ensaios tecnológicos. Na câmara úmida (Figura 3.4) os corpos-de-prova foram curados sob condições de 95% de umidade e temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, valores considerados ideais de acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 2012).



Figura 3.4 – Câmara úmida para processo de cura (Rodrigues, 2012).

3.2.6. Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova

3.2.6.1. Massa específica bulk

A massa específica bulk (ρ_b) dos corpos-de-prova foi determinada de acordo com a seguinte expressão (3.3):

$$\rho_b = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

Onde:

ρ_b – massa específica bulk, em g/cm³;

M – massa do corpo cerâmico, em gramas;

V – volume do corpo cerâmico, em cm³.

3.2.6.2. 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:

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

Onde:

X_u – é o parâmetro (V, L ou d) do corpo de prova cilíndrico após moldagem (cm³);

X_c – é o parâmetro (V, L ou d) do corpo de prova cilíndrico após a cura (cm³);

3.2.6.3. Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada após o período de cura de 28 dias, segundo a norma NBR 10836 (ABNT, 2013). O ensaio de compressão foi realizado com o auxílio de uma máquina de ensaios universal, marca Instron, modelo 5582 com velocidade de carregamento de 1 mm/min (Figura 3.5). Foram analisados sete corpos de prova de cada traço neste ensaio.



Figura 3.5 – Máquina utilizada no ensaio de compressão simples.

A resistência à compressão dos corpos cerâmicos foi obtida a partir da expressão (3.5):

$$T = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

Onde:

T – Tensão de ruptura à compressão simples, em MPa;

F – carga de ruptura, em N;

A – área das peças curadas, em mm²;

3.2.6.4. Absorção de água

A absorção de água foi determinada de acordo com a norma NBR 10836 (ABNT, 2013). O valor de absorção de água foi obtido por meio da expressão (3.6):

$$AA(\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Onde:

AA – absorção de água, em %;

M_u – massa do corpo cerâmico saturado em água, em gramas;

M_s – massa do corpo cerâmico seco, em gramas.

3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos-de-prova

A microestrutura dos corpos-de-prova produzidos foi analisada após a sua cura de 28 dias através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia Confocal. O ensaio de MEV foi realizado em um microscópio eletrônico de varredura/EDS, marca Shimadzu, modelo SSX-550, utilizando-se uma voltagem de aceleração de elétrons de 15 kV. As amostras foram colocadas em porta-amostra, aderidas por uma fita dupla face de carbono. Foi feita a análise da superfície de fratura das peças cerâmicas após metalização com uma fina camada de ouro. A microscopia Confocal foi realizada em um microscópio a laser de medição 3D, modelo LEXT OLS 4000, de fabricação Olympus.

A análise de fases dos corpos cerâmicos incorporados foi feita por difração de raios X para determinar as fases cristalinas remanescentes e as novas fases que foram formadas durante o processo de cura. A análise de difração de raios X (DRX) foi realizada em um difratômetro Shimadzu, XRD-7000 (Figura 3.6), utilizando radiação monocromática de Cu-K_α a uma velocidade de varredura de $1,5^\circ (2\theta)$ por minuto.



Figura 3.6 – Difratômetro de raios X modelo XRD7000, marca SHIMADZU (Gomes, 2016).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização das Matérias-Primas Utilizadas

4.1.1. Análise mineralógica

Na Figura 4.1 é apresentado o difratograma de raios X do resíduo de cinza de madeira utilizado nesse trabalho. Nota-se que o resíduo de cinza de madeira é um material poliminerálico, composto de vários minerais. Observa-se que a calcita (CaCO_3) é a fase mineral principal presente no resíduo, além de terem sido identificados picos de quartzo (SiO_2), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), gibsita ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$), montmorilonita ($(\text{Mg}, \text{Ca}) \text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\text{Si}_5\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), goetita (FeOOH), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) e sulfato de magnésio hidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

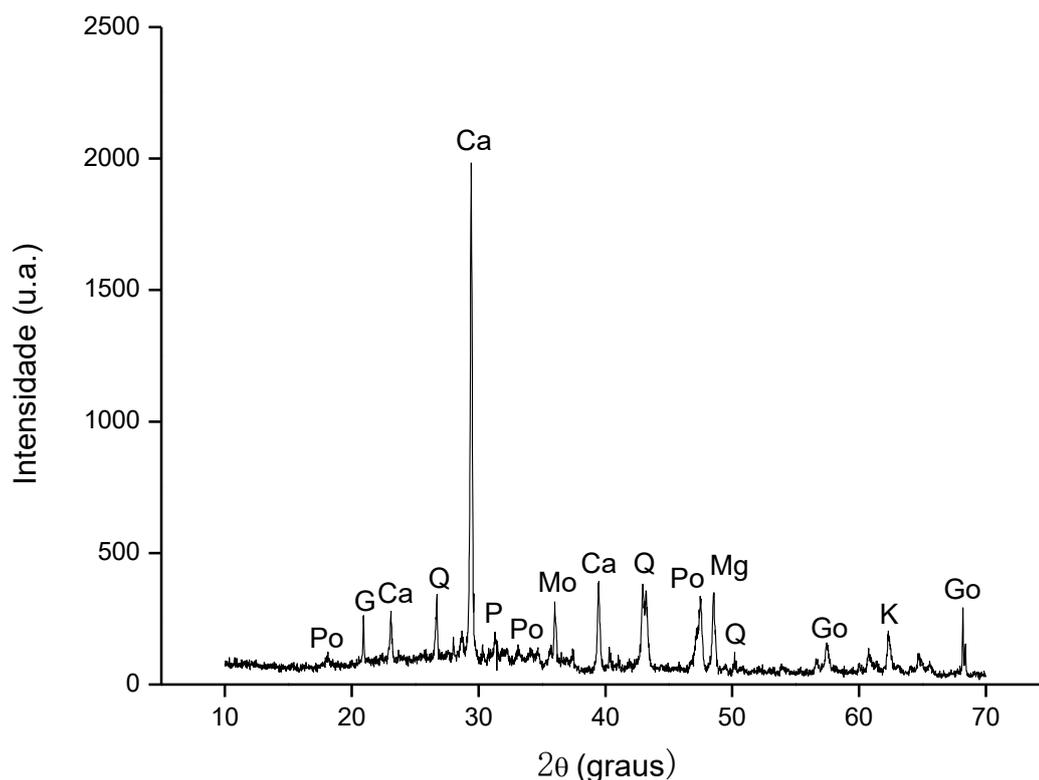


Figura 4.1. – Difratograma de raios X do resíduo de cinza de madeira: Q= Quartzo; Ca=Calcita; G=Gibsita; Mo=Montmorilonita; Go=Goetita; K=Caulinita; P=Fosfato de Cálcio; Po=Portlandita; Mg=Sulfato de magnésio hidratado.

O difratograma de raios X do solo é apresentado na Figura 4.2. Podem-se observar picos que são característicos das seguintes fases cristalinas: quartzo, caulinita, gibsitita, ilita/mica e goetita. Como esperado, a sílica livre (SiO_2) é a fase mineralógica principal do solo, ou seja, o solo é rico na fração areia. É importante ressaltar que, para a mistura de solo-cimento, a grande quantidade de quartzo no solo arenoso é altamente desejável, pois o quartzo diminui a plasticidade do solo arenoso e atua como material não plástico (Amaral, 2016). A presença da caulinita contribui para a trabalhabilidade da massa cerâmica (Carneiro, et al., 2016).

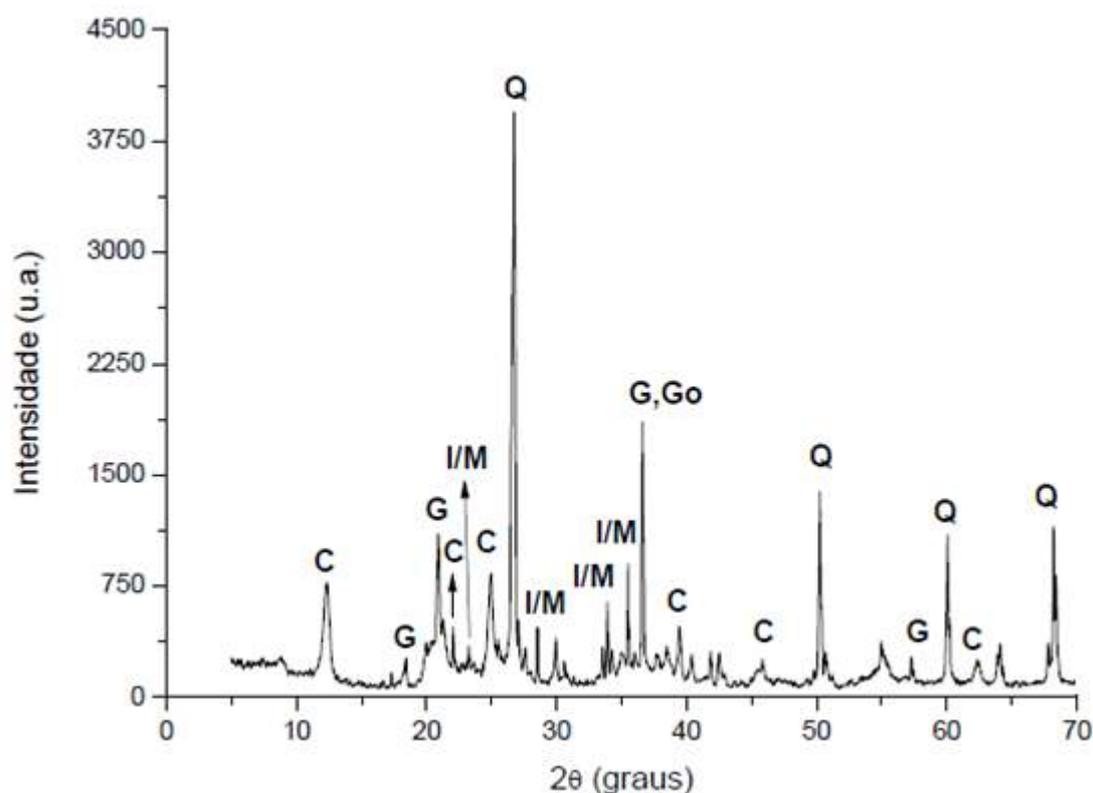


Figura 4.2 – Difratograma de raios X do solo arenoso: C - Caulinita; G - Gibsitita; Go - Goetita; I/M - Ilita/Mica; Q - Quartzo.

Na Figura 4.3 é apresentado o difratograma de raios X do cimento Portland CPIII-40RS. Foram identificadas as seguintes fases mineralógicas: silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) também conhecido como alita, silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) chamado de belita, ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), comumente chamado de gesso.

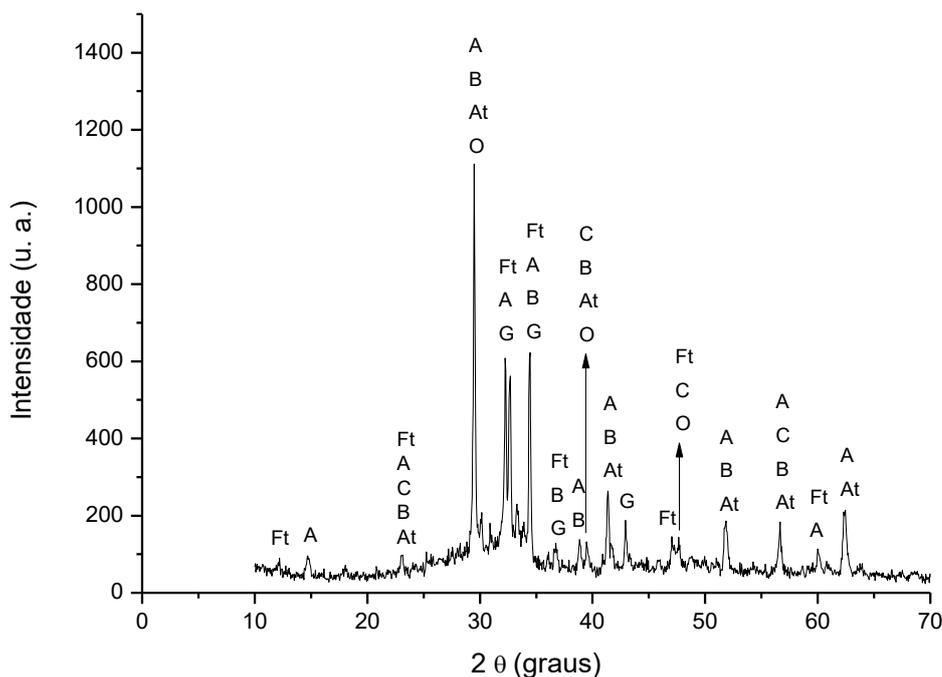


Figura 4.3 – Difratoograma de raios X do cimento Portland C-III-40RS: Ft = Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF); A = Alita (C_2S); C = Carbonato de cálcio; B = Belita (C_2S); At = Aluminato tricálcio (C_3A); O = Óxido de cálcio; G = Gibsita ($CaSO_4$).

Além dessas fases, foi identificada a presença de CaO , que pode estar relacionado à composição da escória de alto forno do cimento estudado (Tabela 2.4) e ao calcário ($CaCO_3$), uma das matérias-primas do cimento Portland.

4.1.2. Análise química

A Tabela 4.1 apresenta a composição química e a perda ao fogo das matérias-primas utilizadas neste trabalho. Pode-se observar que o resíduo de cinza de madeira é constituído principalmente por CaO . O solo arenoso apresenta predominância de sílica (SiO_2) e o cimento Portland C-III - 40RS apresenta alto teor de óxido de cálcio (CaO). Comparando a composição química com a difração de raios X (Figuras 4.1 - 4.3), percebemos que os resultados estão se revalidando, sustentando a existência desses compostos.

De acordo com os dados da Tabela 4.1, a composição química do solo é formado principalmente por SiO_2 (46,70 %), Al_2O_3 (28,63 %) e Fe_2O_3 (7,40 %). Como esperado o solo arenoso utilizado é rico em silício e alumínio, com cerca de 75 % desses elementos em forma de óxidos. A cor avermelhada do solo está relacionada com a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3). A perda ao fogo é relativamente baixa e da ordem de 7, 80 % em peso. Ela está relacionada à alta quantidade de sílica livre no solo e à presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica.

Tabela 4.1 – Composição química do solo, do resíduo de cinza de madeira e do cimento Portland utilizados.

<i>Composição química</i>	<i>Solo arenoso</i>	<i>Cinza de madeira</i>	<i>Cimento Portland CPIII- 40RS</i>
CaO	0,98	40,77	65,15
SiO_2	46,70	9,55	18,87
Fe_2O_3	7,40	4,38	1,21
Al_2O_3	28,63	6,63	7,11
K_2O	3,80	7,35	0,56
SO_3	2,00	1,68	3,71
TiO_2	2,21	0,83	0,53
V_2O_5	0,13	-	-
ZrO_2	0,24	-	-
SrO	0,01	-	0,06
ZnO	0,02	-	-
MgO	-	10,79	-
MnO	0,07	0,72	0,30
Y_2O_3	0,01	-	-
Perda ao Fogo (1000 °C)	7,80	17,30	2,50

Verifica-se que a composição química do resíduo de cinza de madeira é formada principalmente por: óxido de cálcio (40,77 %), sílica (9,55 %), óxido de

potássio (7,35 %) e óxido de magnésio (10,79 %). O resíduo apresenta grande concentração de óxido de cálcio e óxido de silício (50,32 %) assim como o cimento Portland CP III (84,02 %). Isto justifica a proposta desse trabalho de substituir partes de cimento por resíduo de cinza de madeira. O resíduo apresentou perda ao fogo da ordem de 17,30 % em peso que está relacionada à presença de matéria orgânica e à decomposição de compostos mineral presentes no resíduo.

O cimento Portland CP III apresentou um alto percentual de óxido de cálcio (65,15 %) e um percentual de 18,87 % de sílica (SiO_2). A presença do CaO deve-se: ao calcário, uma das matérias-primas do cimento Portland e à escória de alto forno, adicionada ao clínquer para formar o cimento Portland tipo III – 40 RS. A presença de sílica deriva-se da argila que é uma matéria-prima do cimento (Siqueira, 2013). A perda de massa do cimento foi baixa e da ordem de 2,5 %.

A presença de óxido de cálcio (CaO) no resíduo de cinza e no cimento Portland é importante para a formação do hidróxido de cálcio capaz de acelerar o processo de endurecimento da mistura. A reação da cal com o dióxido de carbono é um processo lento, porém quando é adicionada água à cal, forma-se o hidróxido de cálcio que, ao reagir com o dióxido de carbono, acelera o processo de endurecimento da massa cimentícia (Alves, ---).

A presença de sílica (SiO_2) é altamente desejada por sua atuação física e química. Segundo Grande (2003), a ação física da sílica é agir como fíler, preenchendo os vazios disponíveis entre os grãos de cimento. Já a sua ação química é realizar a reação pozolânica na transformação das ligações frágeis do hidróxido de cálcio (CH) em silicato de cálcio hidratado (C-S-H) de maior resistência.

O óxido de magnésio (MgO) encontrado com teor de aproximadamente 11 % no resíduo de cinza apresenta uma facilidade de reagir com água e formar hidróxido de magnésio. Nesse processo ocorre uma expansão volumétrica aparente (EVA) que muitas vezes não são acomodadas na porosidade e é capaz de gerar tensões de compressão capazes de romper o material, afirma Salomão e Pandolfelli (2008).

A presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) é responsável pela coloração avermelhada das peças de solo-cimento.

O anidro sulfúrico (SO_3) presente no solo, no resíduo e no cimento contribui para delongar o tempo de pega do cimento facilitando o manuseio da mistura de solo-cimento, afirma Amaral (2016).

4.1.3. Análise granulométrica

A Figura 4.4 apresenta a curva de distribuição de tamanho das partículas do resíduo de cinza de madeira. Em termos de escala de solo, a amostra do resíduo de cinza de madeira contém 83,0 % de fração areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$), 12,2 % de fração silte ($2 \mu\text{m} \leq x < 60 \mu\text{m}$) e 4,8 % de fração argila ($< 2 \mu\text{m}$). O alto percentual das frações silte e areia (95,2 %) indicam que o resíduo apresenta uma granulometria mais grosseira.

O resíduo de cinza de madeira apresentou densidade real de grãos igual a $2,49 \text{ g/cm}^3$. Este valor é muito próximo de $2,44 \text{ g/cm}^3$ encontrado por Silva, et al. (2015) ao medir a massa específica da cinza de biomassa, formada por 80 % de cinza de eucalipto e 20 % de cinza da casca de amêndoa de cacau, em pictômetro a hélio.

O teor de umidade higroscópica do resíduo de cinza de madeira obtido foi de 1,7 %. Esse valor pode estar relacionado ao estado bruto do resíduo de cinza utilizado no ensaio granulométrico.

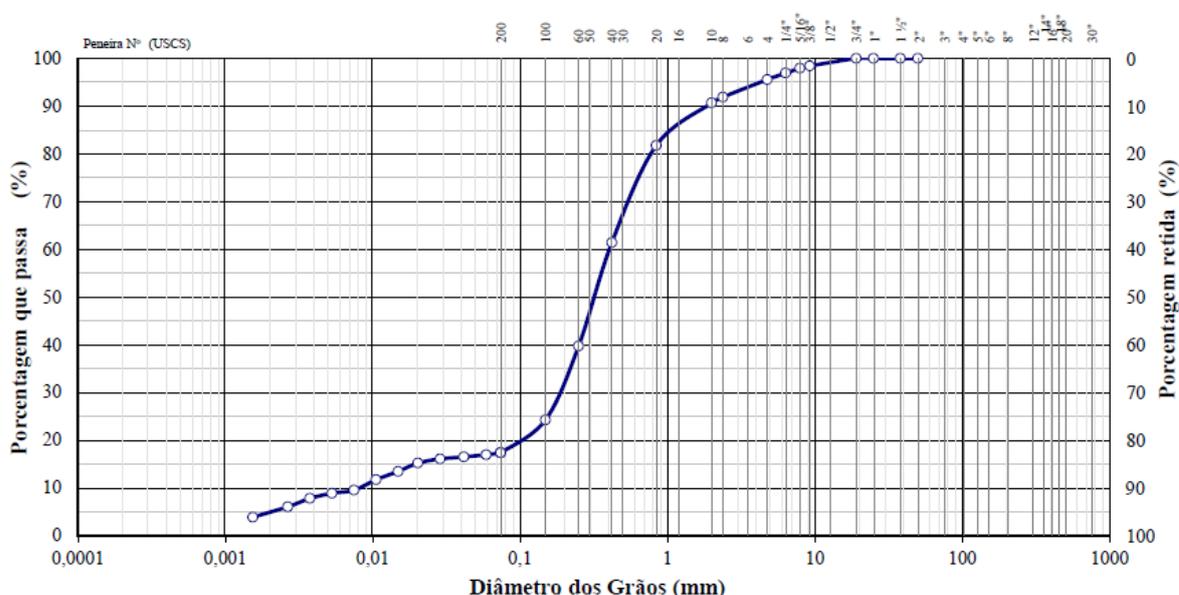
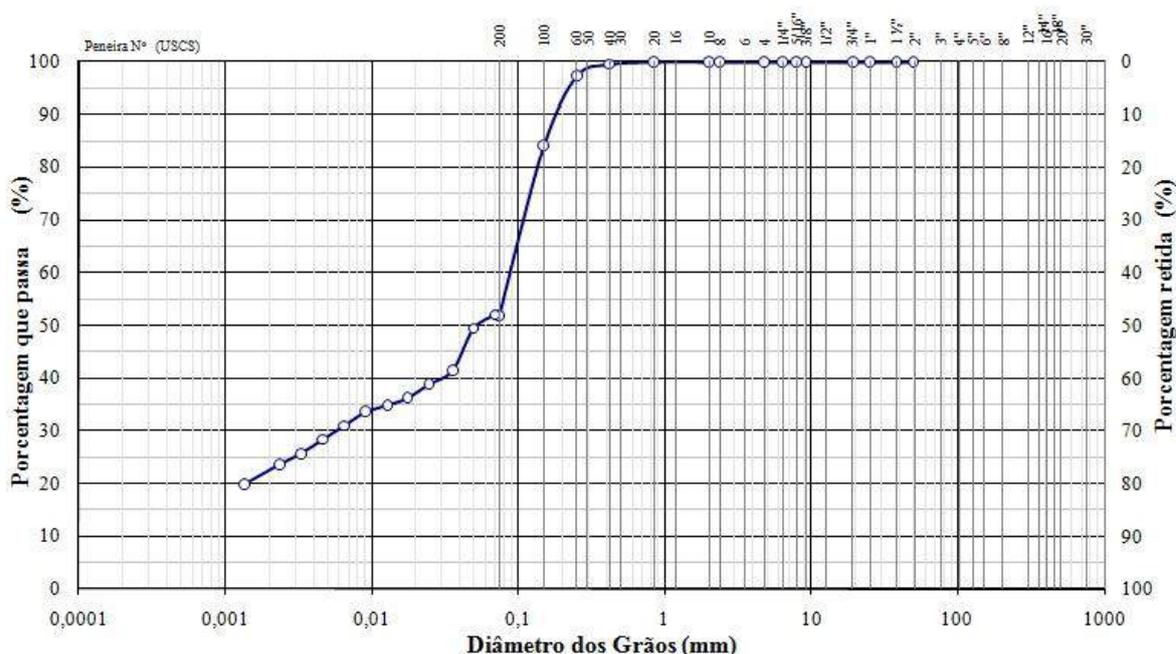


Figura 4.4 – Distribuição de tamanho de partícula do resíduo de cinza de madeira.

A curva de distribuição de tamanho de partícula do solo é apresentada na Figura 4.5. Observa-se que o solo apresenta um percentual de 23 % de partículas de granulometria abaixo de 2 μm , que corresponde à fração argila. A fração silte ($2 \mu\text{m} \leq x < 60 \mu\text{m}$) é de 29 % e a fração areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$) é de 48 %. Verifica-se que o tamanho médio das partículas do solo é da ordem de 50 μm .

Nota-se que o solo arenoso utilizado apresenta um grande percentual de partículas grosseiras, particularmente de partículas de quartzo. Isto é muito importante na preparação da mistura solo-cimento. De acordo com Segantini (2000), a presença de areia na composição do solo, a qual atua como material inerte e com função apenas de enchimento, permitindo a liberação de maior quantidade de cimento para aglomerar os grãos menores.



indicando que este solo pode ser utilizado para fabricação de tijolos do tipo solo-cimento.

Tabela 4.2 – Composição granulométrica do solo e as porcentagens recomendadas pelo CEPED (1999) e ABCP (2002).

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

4.1.4. Plasticidade

Os valores dos limites de consistência de Atterberg do solo arenoso estão apresentados na Tabela 4.3. O solo arenoso estudado apresentou índice de plasticidade da ordem de 9,5 %, o qual pode ser classificado como um material com baixa plasticidade e, portanto, ideal para solo-cimento. Os solos indicados para fabricação de tijolo solo-cimento são os solos arenosos porque se estabilizam com menores quantidades de cimento. Os limites de consistência são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade dos solos.

Verifica-se que os valores de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) estão de acordo com os valores recomendados pela ABCP (LL ≤ 45 % e LP ≤ 18 %) para produção de tijolo solo-cimento. É importante ressaltar também que os teores de materiais plásticos e não plásticos estão relacionados diretamente com a plasticidade, podendo influenciar nos fatores tecnológicos como conformação, resistência mecânica e ainda no comportamento de hidratação do cimento.

Tabela 4.3 – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).

	<i>Limite de Liquidez</i>	<i>Limite de Plasticidade</i>	<i>Índice de Plasticidade</i>
Solo utilizado	27,9	18,4	9,5
ABCP	≤ 45,0	≤ 18,0	-

Quanto à plasticidade do resíduo de cinza de madeira foi verificado, a partir de repetidos testes, que o mesmo não apresenta plasticidade, podendo ser classificado como material não plástico. Esse resultado é ideal para a sua utilização na produção de massas cimentícias de solo-cimento visto que o resíduo pode influenciar positivamente nas propriedades tecnológicas como absorção de água e resistência à compressão simples dos tijolos.

4.1.5. Análise térmica

O comportamento térmico do solo arenoso foi analisado por meio dos ensaios de análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG).

A Figura 4.6 apresenta as curvas de ATD e ATG do solo arenoso. De acordo com a curva de ATD, a amostra do solo apresenta três pequenos vales endotérmicos nas temperaturas de 52 °C, 270 °C e 490 °C, respectivamente. O pico endotérmico em torno de 52 °C possui perda de massa de aproximadamente 0,72 % que está associado à perda de água de umidade e de água adsorvida da caulinita. A água líquida, que preenche os capilares no solo, apresenta um pico endotérmico, agudo e mais intenso à medida que houver mais água (Santos, 1989). O pico endotérmico na temperatura de 270 °C apresenta perda de massa de 1,76 % que está associado à desidratação de hidróxidos como a gibsita e a goetita, e pela decomposição de matéria orgânica (Siqueira, 2013). Nota-se outro pico endotérmico em torno de 490 °C, com perda de massa de 4,97 % que está relacionado à desidroxilação (perda de OH) da caulinita para formar a metacaulinita que é amorfa e apresenta algumas estruturas residuais (Santos, 1989). Não se verifica nenhum outro evento térmico até à temperatura de cerca de 1000°C.

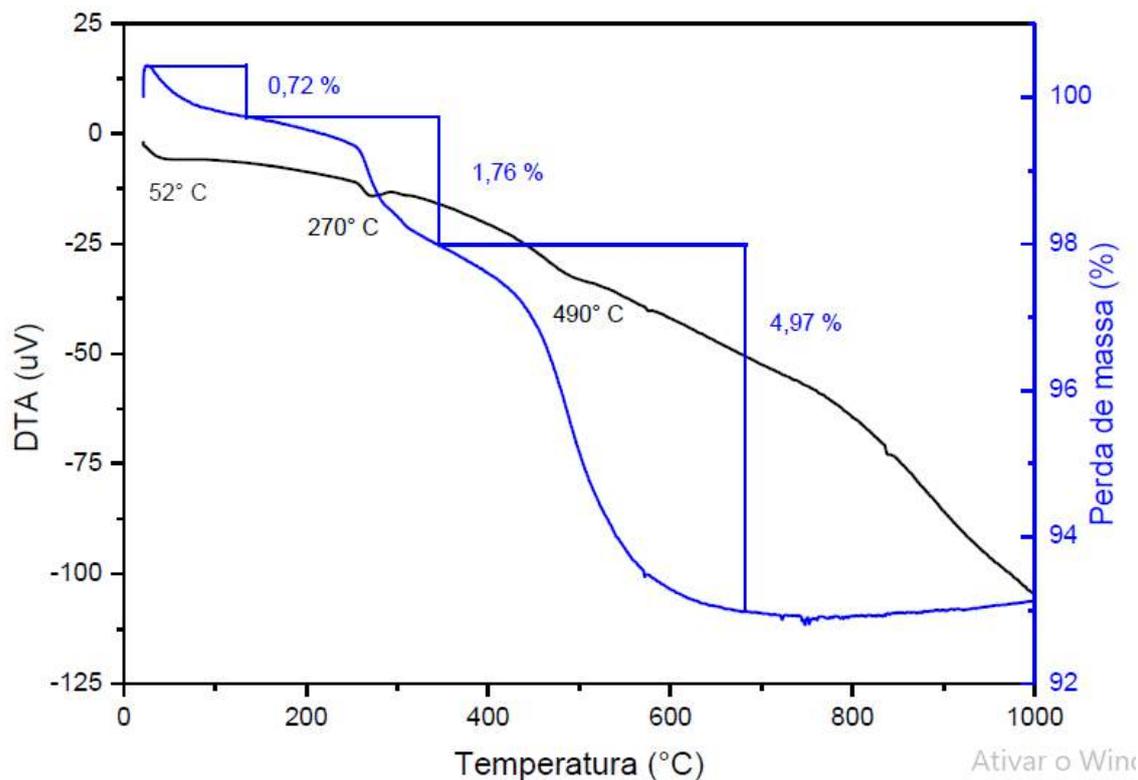


Figura 4.6 – Curva de análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG) do solo arenoso.

A Figura 4.7 apresenta a curva da análise termogravimétrica (ATG) do resíduo de cinza de madeira. Essa análise complementa a caracterização mineralógica por DRX do resíduo e permite conhecer o comportamento térmico do mesmo. A primeira etapa da curva deve-se à perda de 2 % de massa devido à perda de água adsorvida do resíduo em aproximadamente 275 °C. Em torno de 600 °C ocorre a desidratação do sulfato de magnésio hidratado (Salomão e Pandolfelli, 2008) com perda de massa de 20,2 %. Percebe-se também uma terceira perda de massa de 12 % referentes à decomposição da calcita (carbonato de cálcio - CaCO_3) formando cal (CaO) e liberando CO_2 (Silva, et al. 2016). Pode-se notar que durante o processo de queima, o resíduo de cinza de madeira apresentou alta perda de massa em diferentes temperaturas.

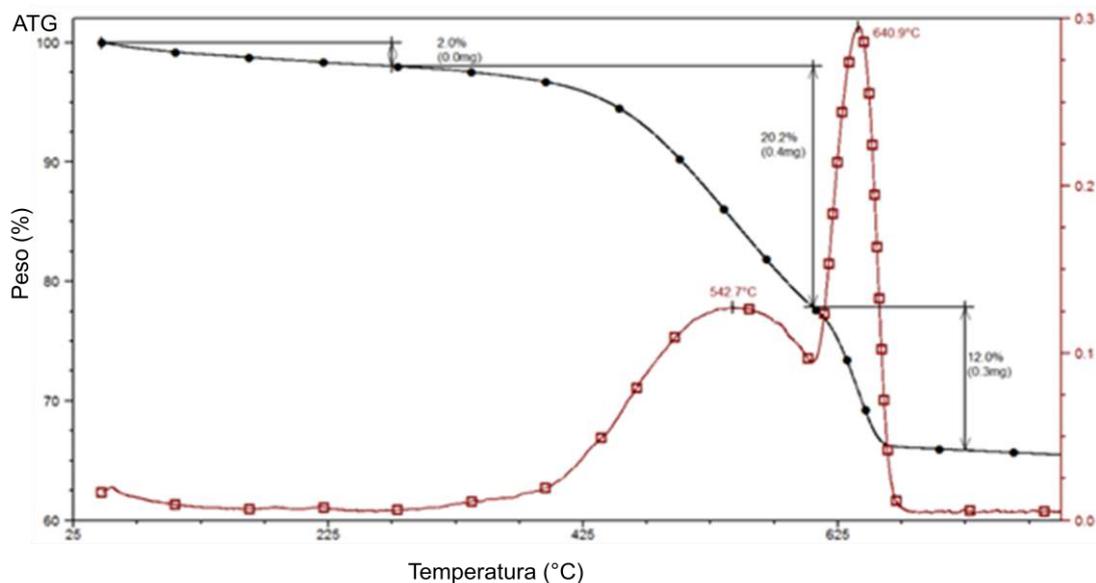


Figura 4.7 – Curva de análise termogravimétrica (ATG) do resíduo de cinza de madeira.

4.1.6. Análise da atividade pozolânica da cinza de serragem de madeira

A Tabela 4.4 apresenta o índice de atividade pozolânica do resíduo de cinza de madeira obtido utilizando o método de Luxan *et al.* (1989). Percebe-se que o resíduo pode ser classificado como um material com atividade pozolânica moderada ($0,4 < mS/cm < 1,2$). Isto significa que o resíduo de cinza de madeira tem potencial para ser usado como material pozolânico contribuindo com a trabalhabilidade da mistura, aumento da resistência à fissuração e maior impermeabilidade (Mehta, 1987).

Tabela 4.4 – Classificação da atividade pozolânica e o índice de atividade do resíduo de cinza de madeira obtido utilizando o método de Luxan *et al.* (1989).

Classificação	Índice de atividade pozolânica ($\mu S/cm$)	Índice do resíduo de cinza de madeira ($\mu S/cm$)
Nenhuma	< 0,4	
Moderada	0,4 – 1,2	0,5
Boa	> 1,2	

4.1.7. Teor de matéria orgânica (MO), sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos de teor de matéria orgânica (MO), teor de sais solúveis, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH para a amostra de resíduo de cinza de madeira. Percebe-se que o resíduo de cinza de madeira apresenta pH acima de 7 e portanto é classificado como um material básico (Embrapa, 2010). Verifica-se também uma presença considerável dos sais solúveis: potássio – K, cálcio – Ca, sódio – Na e magnésio – Mg. O resíduo de cinza apresentou 6,8 % de matéria orgânica. A capacidade de troca de cátions (CTC) é a quantidade de cátions que um solo é capaz de reter por unidade de peso. O resíduo de cinza de madeira apresentou CTC igual a 170,1 milimolc/dm³ e está dentro da faixa dos argilominerais que vai de 50 a 500 milimolc/dm³ (Embrapa, 2010).

Tabela 4.5 – Características do resíduo de cinza de madeira.

pH	K	Ca	Na	Mg	C	MO	CTC
(H ₂ O)	(milimolc/dm ³)				(g/dm ³) /%		(milimolc/dm ³)
10,4	69,3	18,3	8,5	44,0	39,6	6,8	170,1

4.1.8. Análise morfológica da cinza de serragem de madeira

Os aspectos morfológicos das partículas do resíduo de cinza de serragem de madeira foram obtidos via microscopia eletrônica de varredura-MEV e são apresentados na Figura 4.8.

Observa-se que o resíduo é composto predominantemente de partículas heterogêneas, com formatos irregulares e larga distribuição de tamanho de grãos. Estas características foram encontradas também no trabalho de Bennack (2016) ao analisar a cinza de madeira proveniente do processo de combustão da indústria madeireira de Santa Catarina.

Percebe-se também que não houve uma combustão completa da cinza ao identificarmos algumas estruturas irregulares e lamelares, parecido à fibra e

destacadas pelas setas amarelas na Figura 4.8a. Essas estruturas assemelham a canais e paredes característicos da madeira in natura, afirma Andrade (2012) apud. Bennack (2016).

Na Figura 4.8b está identificado por setas vermelhas alguns aglomerados de partículas formados após a combustão da lenha. A presença desses aglomerados contribui para a formação de um material mais poroso (Bennack, 2016).

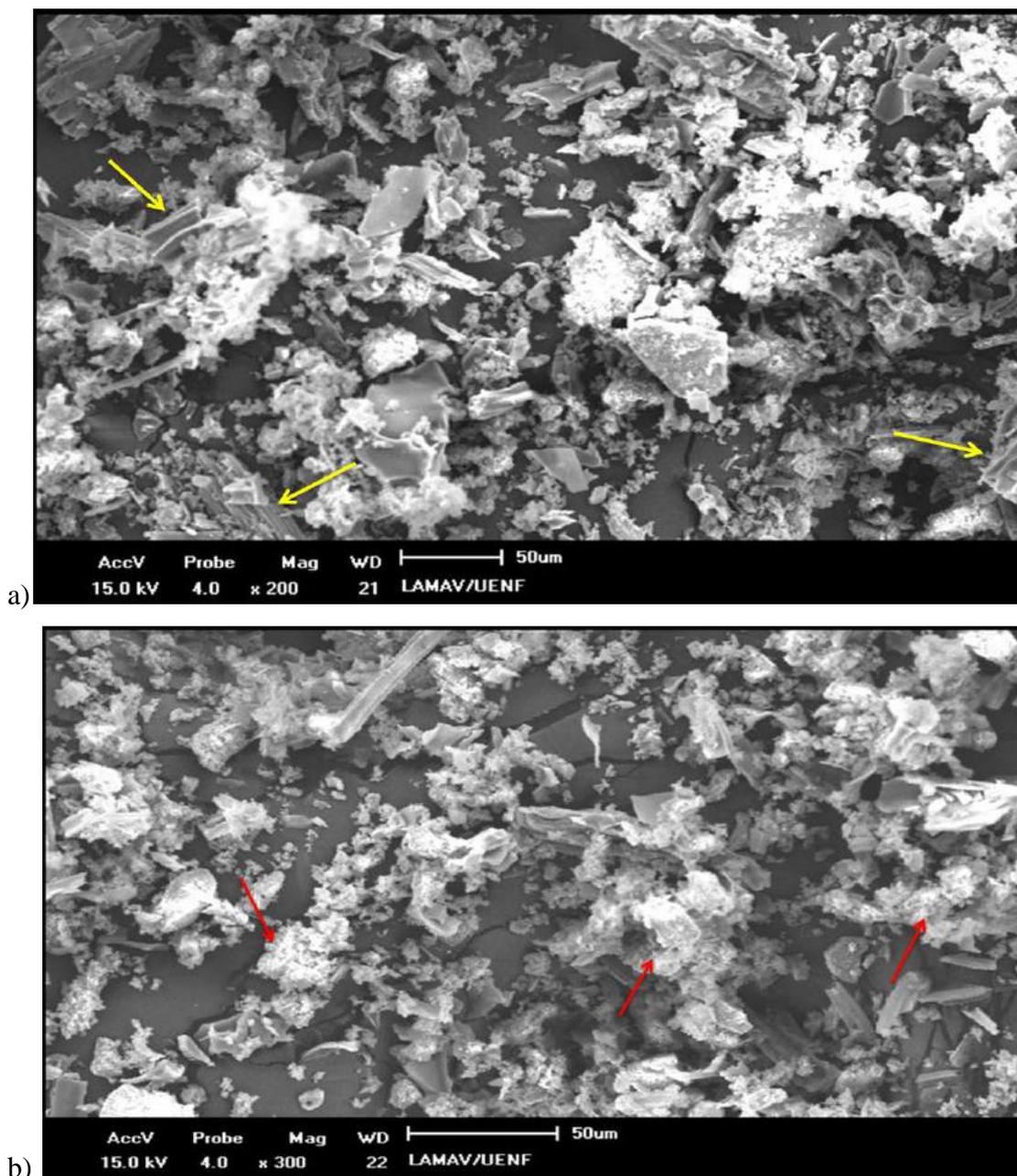


Figura 4.8 – Microscopia eletrônica de varredura do resíduo de cinza de madeira: a) com aumento de 200x e em b) com aumento de 300x.

A Figura 4.9 apresenta o espectro de elementos obtido via MEV/EDS para a amostra do resíduo de cinza de madeira. Foram detectados os seguintes elementos: C, Ca, Fe, Al, Si, Mg, O e K. Estes resultados são consistentes com os dados de composição química e difração de raios X.

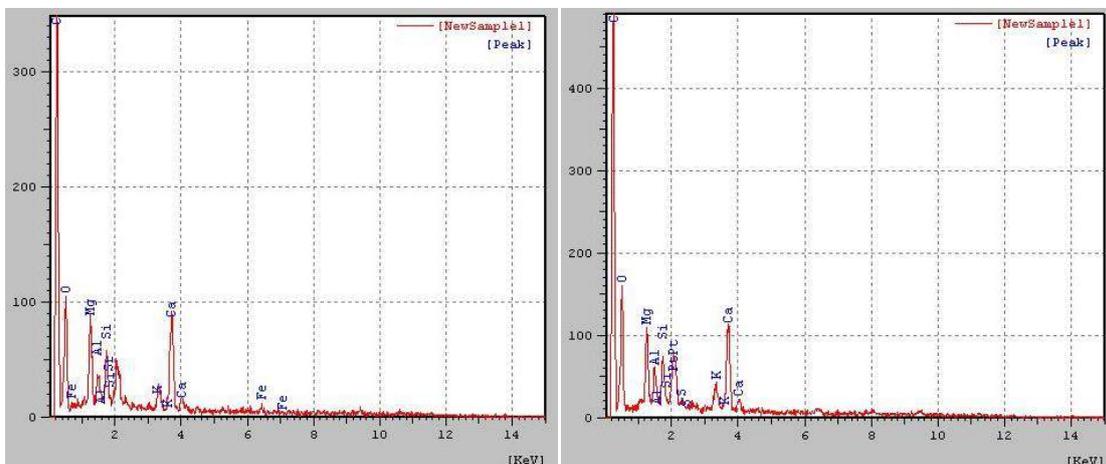


Figura 4.9 – Espectro de EDS do resíduo de cinza de madeira.

4.2. Avaliação das propriedades tecnológicas dos corpos de prova incorporados com resíduo de cinza de madeira

As Figuras de 4.10 a 4.15 apresentam os resultados obtidos nos ensaios das propriedades tecnológicas: massa específica bulk, variação dimensional, resistência à compressão e absorção de água, respectivamente, dos corpos cimentícios produzidos e curados por 28 dias em câmara úmida.

4.2.1. Massa específica aparente

A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos no ensaio de massa específica bulk para os corpos de prova curados em câmara úmida por 28 dias. Percebe-se que os corpos de prova com adição de resíduo apresentaram uma redução de sua massa específica quando comparados aos corpos de prova do traço de referência (sem resíduo). Esse fato pode ser explicado porque à medida que se incorporou resíduo de cinza foi reduzindo a porcentagem de cimento nas composições, aumentando assim os índices de vazios, devido à menor densidade do resíduo de cinza de madeira ($2,49 \text{ g/cm}^3$) quando

comparada à massa específica do cimento Portland ($2,98 \text{ g/cm}^3$). Valores semelhantes foram encontrados por Silva, et al. (2015) em suas pesquisas.

Percebe-se que a adição de 30 % de resíduo de cinza de madeira apresentou maior densidade e com valores mais próximos dos corpos de prova padrão. Isso pode ser explicado pelo valor ótimo de resíduo capaz de realizar atividade pozolânica com os compostos de hidratação do cimento e aumentar o empacotamento da massa cimentícia. Isso justifica uma maior resistência à compressão em relação aos outros traços estudados e uma menor absorção de água.

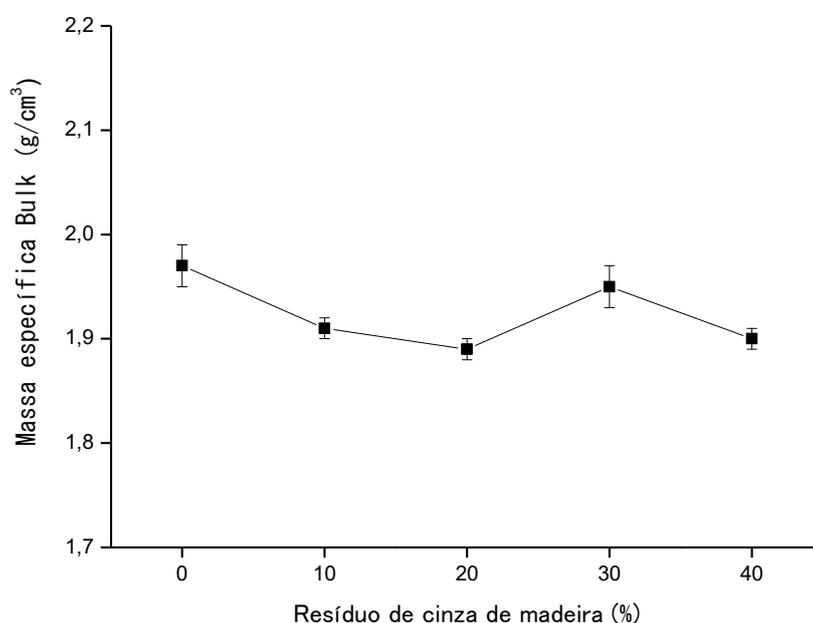


Figura 4.10 – Massa específica Bulk dos corpos de prova após processo de cura de 28 dias.

4.2.2. Variação dimensional

Os resultados obtidos em relação à variação volumétrica, diametral e linear dos corpos de prova antes e após o período de 28 dias de cura são apresentados na Figura 4.11. Percebe-se que os corpos de prova com incorporação de 20 e 30 % de resíduo de cinza de madeira apresentaram as menores variações em seus volumes, diâmetros e alturas. Os corpos de prova com 10 % de resíduo apresentaram as maiores variações volumétricas e

lineares e com valores distintos resultando em maior desvio padrão. A variação diametral dos traços com 20 e 30 % de resíduo foi praticamente nula. Em geral os corpos de prova apresentaram uma variação dimensional desprezível e ideal para a produção de tijolos do tipo solo-cimento.

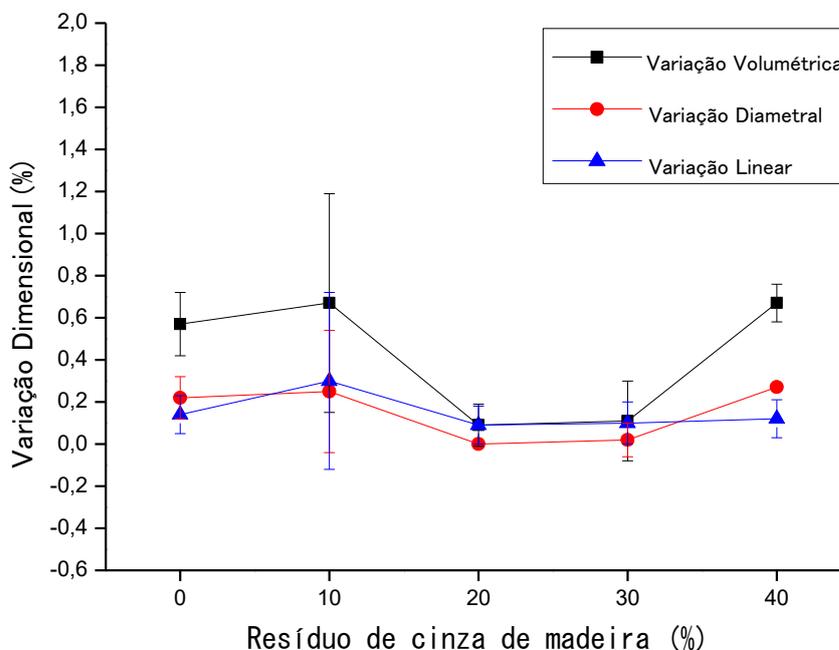


Figura 4.11 – Variação Volumétrica, diametral e linear dos corpos de prova após cura de 28 dias.

4.2.3. Resistência à compressão

A resistência à compressão simples é um dos parâmetros regulamentados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas para solo-cimento. Em sua norma NBR 10834 para bloco de solo-cimento sem função estrutural é determinado valor mínimo médio de 2 MPa. Verifica-se na Figura 4.12 que todos os corpos de prova produzidos e curados por 28 dias apresentaram valores acima dos recomendados pela norma. Percebe-se que à medida que se incorporaram 10 e 20 % de resíduo de cinza, a resistência dos corpos de prova diminuiu, porém na adição de 30 % do resíduo foram atingidos os mais altos valores de resistência à compressão simples. Isso se deve ao fato de os corpos de prova com 30 % de resíduo apresentar melhor

empacotamento. Isto será visualizado mais adiante na análise microestrutural via microscopia eletrônica de varredura.

Verifica-se que a adição acima de 30 % de resíduo de cinza de madeira provocou uma diminuição da resistência dos corpos de prova. Isso se deve a dois efeitos principais: a) reduzido percentual de cimento na mistura, que é o material responsável pela promoção de resistência mecânica nos traços; e b) diminuição do efeito filler do resíduo resultando em uma mistura com menor compactação e uma presença maior de vazios. Em sua pesquisa Silva (2005) também verificou que a incorporação de resíduo de madeira na mistura de solo-cimento influenciou na resistência mecânica das peças produzidas e concluiu que, nos solos mais arenosos, ocorre o aumento da resistência até certo teor de resíduo, e em seguida ocorre uma redução de sua resistência.

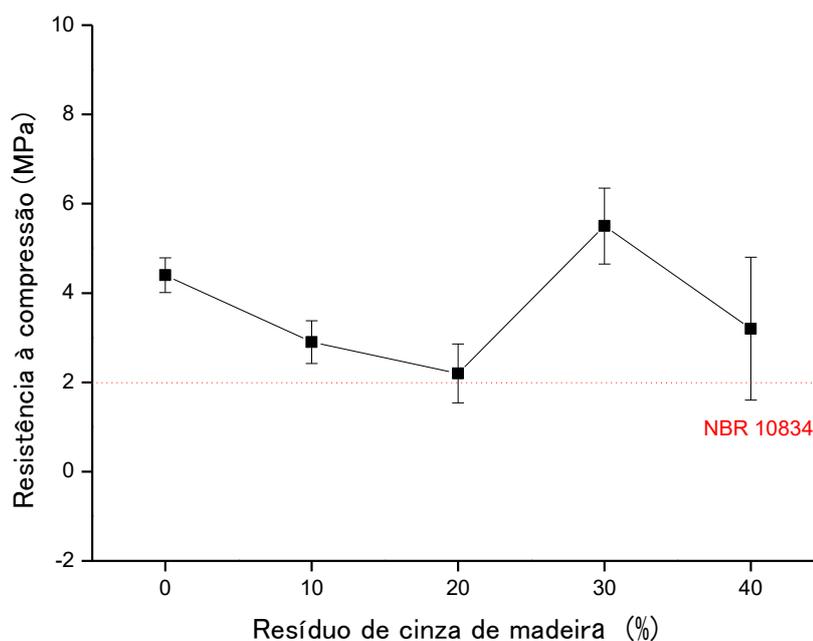


Figura 4.12 – Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos, incorporados com resíduo de cinza de madeira.

A Figura 4.13 apresenta os resultados individuais obtidos após o ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova curados por 28 dias. Percebe-se que todos os corpos de prova produzidos usando resíduo de cinza de madeira apresentaram valores individuais dentro do especificado na norma NBR 10834, que exige valores iguais ou superiores a 1,7 MPa. Isto se deve a

alguns fatores que contribuem para um melhor comportamento mecânico: bom empacotamento das partículas, novas fases formada e maior densificação, afirma Carreiro et al. (2016).

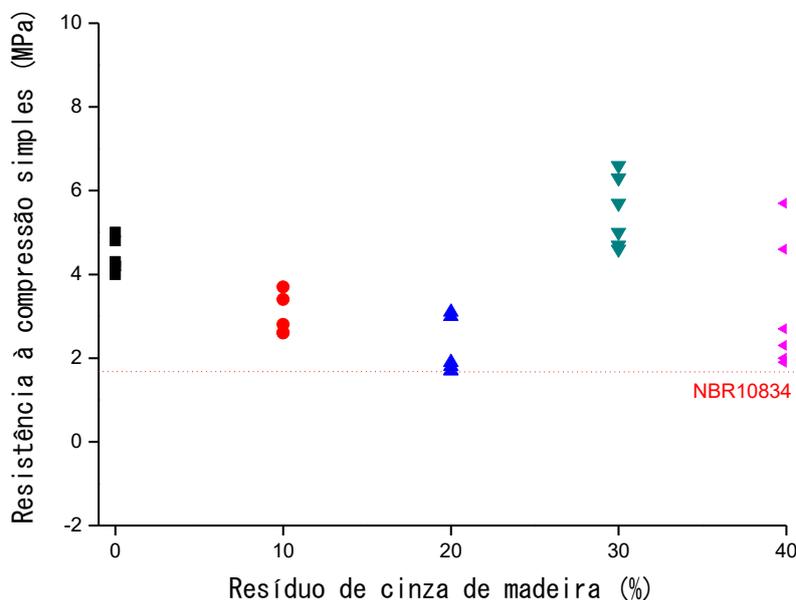


Figura 4.13 – Resistência à compressão individual dos corpos de prova cilíndricos, incorporados com resíduo de cinza de madeira.

4.2.4. Absorção de água

A Figura 4.14 apresenta os valores de absorção de água dos corpos de prova de solo-cimento. A norma NBR 10834 estabelece valores de absorção de água para corpos de prova de solo-cimento da ordem de $\leq 20\%$. Percebe-se que os corpos de prova sem adição de resíduo de cinza de madeira apresentaram valores muito próximos de 20%, no limiar daquele estabelecido pela norma NBR 10834. Quando o resíduo de cinza de madeira é adicionado como substituto de cimento Portland ocorreu um pequeno aumento nos valores de absorção de água. Isso pode estar relacionado à maior rugosidade do resíduo de cinza de madeira que, por conseguinte reteve mais água nas composições gerando maior quantidade de vazios nos corpos cimentícios (Silva, et al., 2015). Mais especificamente, a absorção de água aumenta com

adição de até 20 % de resíduo, depois diminui com o aumento até 30 % de resíduo e novamente aumenta com adição de 40 % em peso de resíduo.

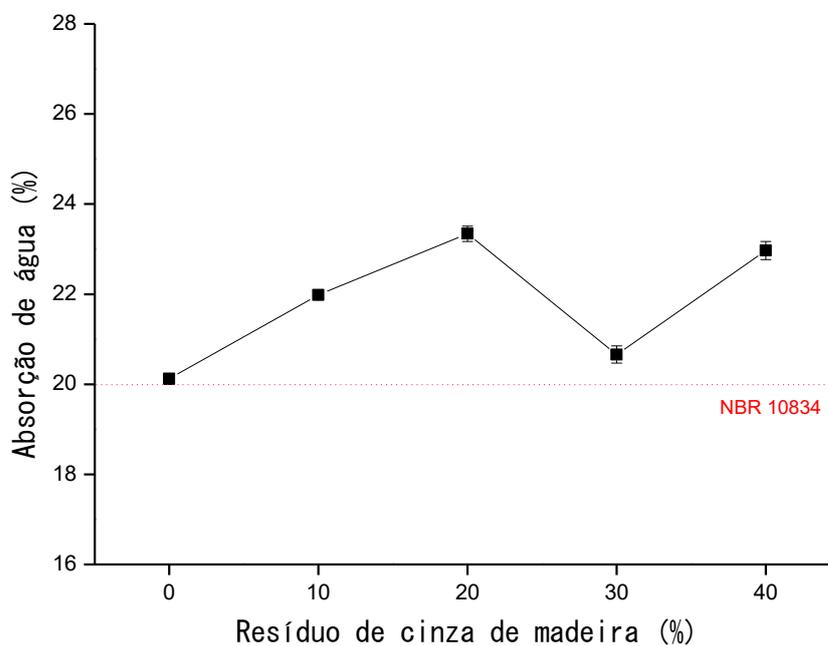


Figura 4.14 – Resultados do ensaio de absorção de água dos corpos de prova após cura de 28 dias.

Os resultados individuais para o ensaio de absorção de água para os corpos de prova incorporados com cinza de madeira e curados por 28 dias em câmara úmida são apresentados na Figura 4.15. Verifica-se que os corpos de prova sem adição de resíduo apresentou valores mais constantes e próximos ao exigidos pela NBR 10834. Em relação aos traços incorporados com resíduo percebe-se que a incorporação de 30 % de resíduo apresenta bons resultados individual para absorção de água, sendo o mais indicado para a utilização para solo-cimento.

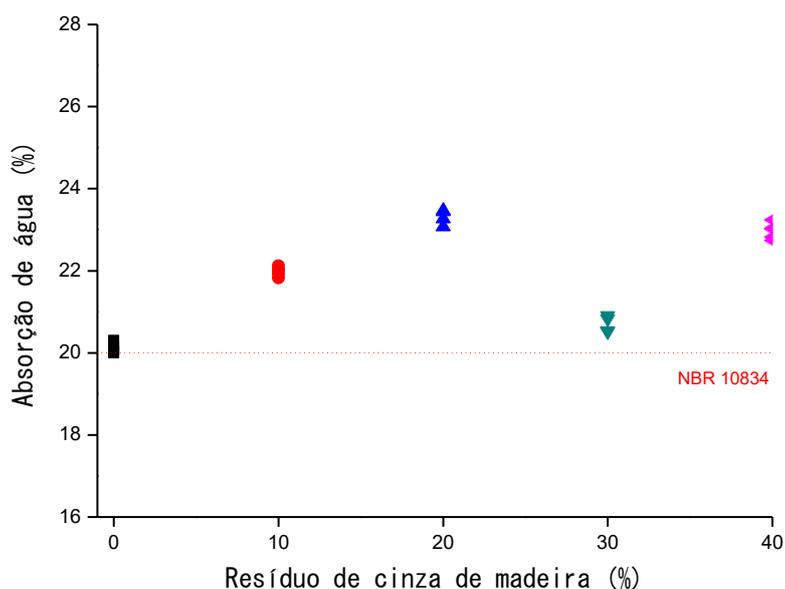


Figura 4.15 – Resultados do ensaio individual de absorção de água dos corpos de prova após cura de 28 dias.

4.3. Análise de fases

A Figura 4.16 apresenta o difratograma de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 10 % de resíduo de cinza de madeira, após passarem por um período de cura de 28 dias. A adição do resíduo de cinza de madeira não modificou as fases cristalinas: caulinita, quartzo, hematita e muscovita. Verifica-se a fase de cristobalita que é uma das formas polimórficas da sílica. Percebe-se a formação de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 ou Portlandita, etringita e silicato de cálcio hidratado resultantes do processo de hidratação do Cimento Portland.

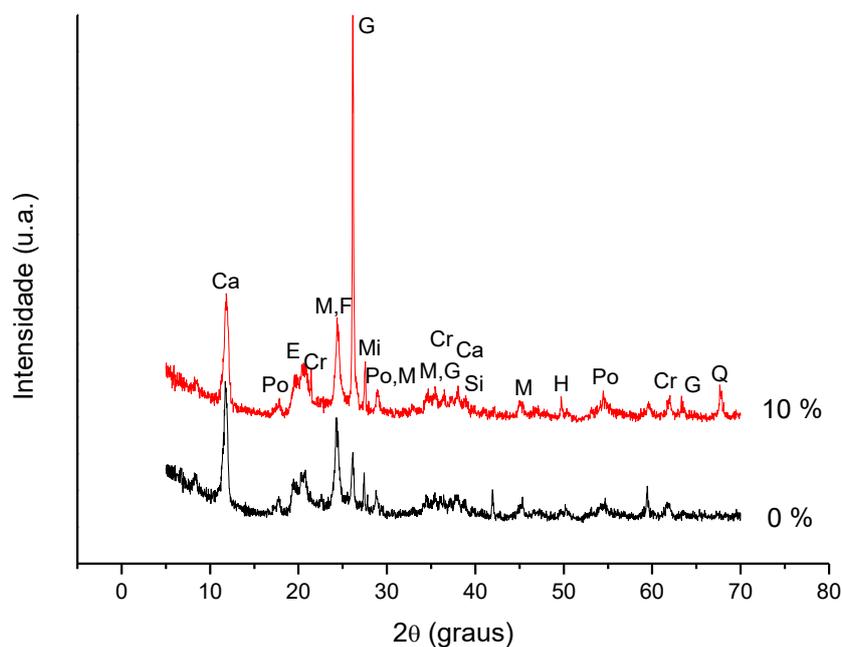


Figura 4.16 – Difração de raios X dos corpos cimentíceos com incorporação de 0 e 10 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; Mi = Microcrina; Po = Portlandita; Ca = Caulinita; E = Etringita, Si = Silicato de cálcio hidratado; G = Goetita; I = Ilita; Q = Quartzo; Cr = Cristobalita; H = Hematita e F = Feldspato sódico.

A Figura 4.17 apresenta o difratograma de raios X dos corpos cimentíceos com incorporação de 0 e 20 % de resíduo de cinza de madeira, após passarem por um período de cura de 28 dias. Percebe-se a introdução de um pico de grande intensidade de microcrina no ângulo de $23,4^\circ$ e um pico intenso de goetita no ângulo de $53,2^\circ$. Percebe-se que aconteceu a introdução de nova fase de etringita e de silicato de cálcio hidratado resultante do processo de hidratação do cimento. O quartzo e a mica muscovita são fases ditas residuais, ou seja, provenientes da matéria-prima no seu estado natural (Carreiro et al., 2016).

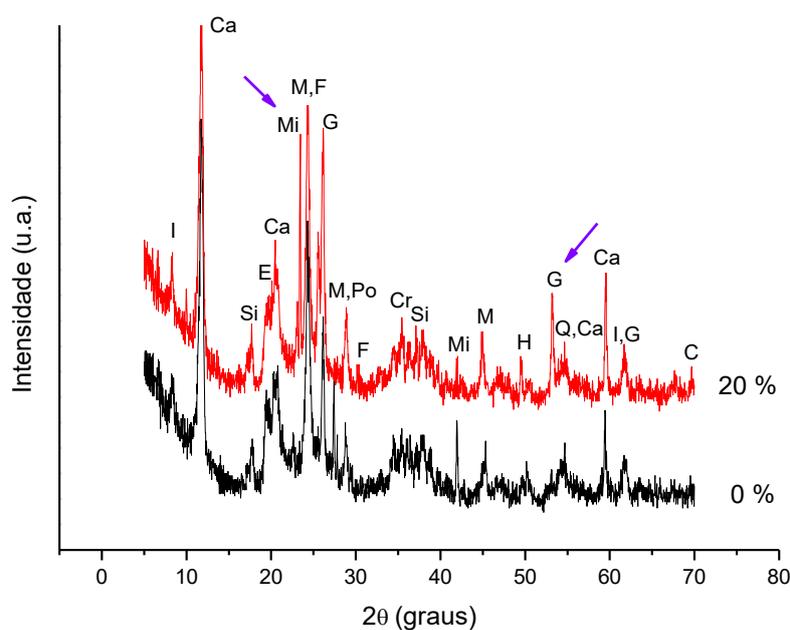


Figura 4.17 – Difração de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 20 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; Mi = Microcrina; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Goetita; I = Ilita; Si = Silicato de cálcio hidratado; Po = Portlandita; Cr = Cristobalita; Q = Quartzo; H = Hematita e F = Feldspato sódico.

A Figura 4.18 apresenta o difratograma de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 30 % de resíduo de cinza de madeira, após passarem por um período de cura de 28 dias. Percebe-se que aconteceu a introdução de uma nova fase de silicato de cálcio hidratado. De acordo com Siqueira (2013), durante o processo de cura, é formada essa fase por causa da hidratação das fases anidras do cimento. Verifica-se a presença da fase hidratada do cimento conhecida como etringita.

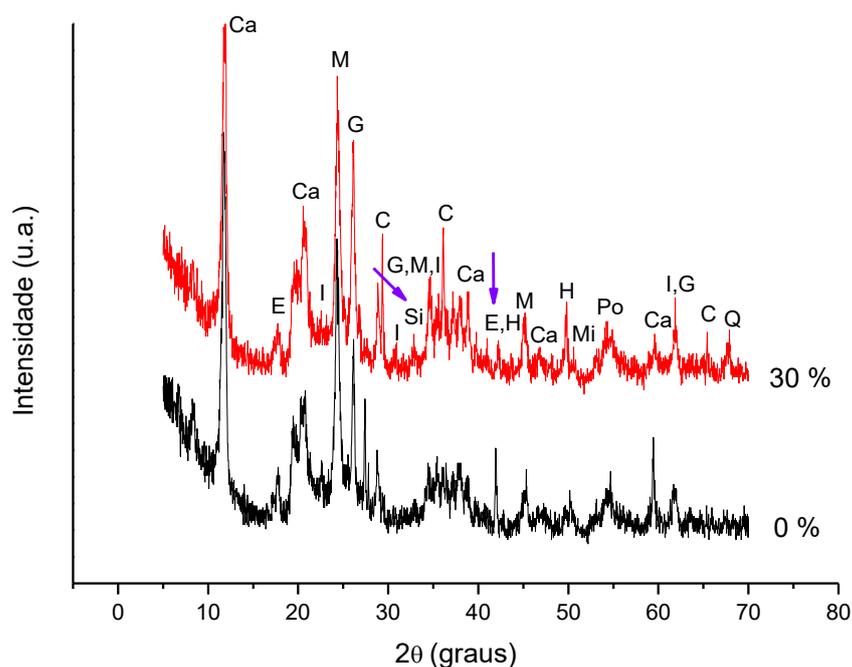


Figura 4.18 – Difração de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 30 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Goetita; I = Ilita; Q = Quartzo; Po = Portlandita; H = Hematita e Si = Silicato de cálcio (Ca_3SiO_5).

A Figura 4.19 apresenta o difratograma de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 40 % de resíduo de cinza de madeira. Percebe-se a presença de etringita, portlandita e silicato de cálcio hidratado resultantes do processo de hidratação do cimento presente na mistura. Verifica-se a formação de um pico de grande intensidade de Portlandita no ângulo de $34,3^\circ$.

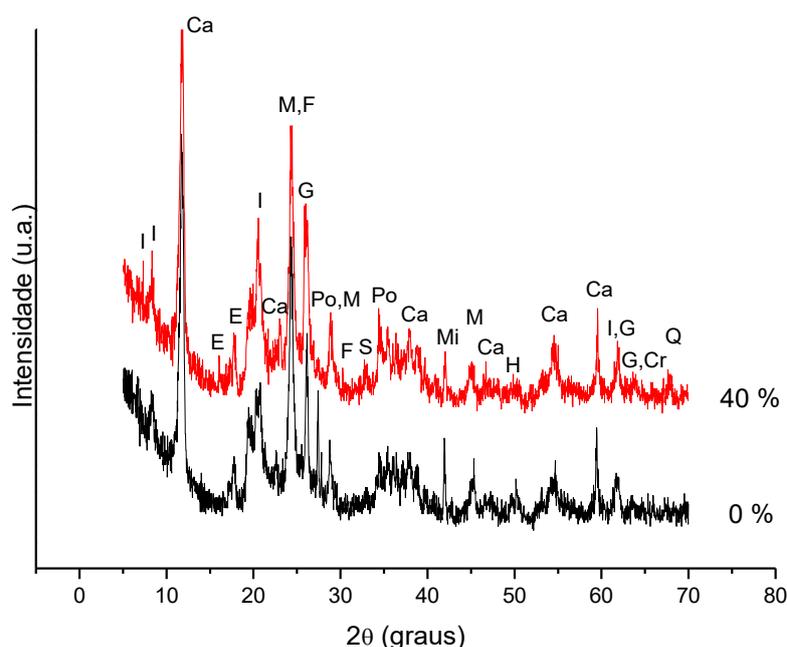


Figura 4.19 – Difração de raios X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 40 % de resíduo de cinza de madeira: M = Muscovita; Mi = Microcrina; E = Etringita; Ca = Caulinita; G = Goetita; I = Ilita; Po = Portlandita; Si = Silicato de cálcio; Cr = Cristobalita; Q = Quartzo; H = Hematita e F = Feldspato sódico.

4.4. Análise microestrutural

4.4.1. Microscopia confocal

A análise microestrutural dos corpos cimentícios estudados contribui para o maior entendimento do comportamento das suas propriedades em função da adição de resíduo de cinza de madeira e da hidratação do cimento.

A Figura 4.20 apresenta as micrografias obtidas por microscopia confocal, com aumento de 108x, 216x e 430x, da superfície de fratura para os corpos de solo-cimento preparados com a massa cimentícia de referência, ou seja, corpos cimentícios sem incorporação de resíduo de cinza de madeira. Todos os corpos cimentícios foram curados durante 28 dias. Verifica-se que os corpos de prova apresentam grande quantidade de quartzo destacada por círculos amarelos. Isso pode estar relacionado com o alto teor de partículas de quartzo livre (SiO_2) encontrado no solo arenoso e no cimento Portland (Tabela 4.1).

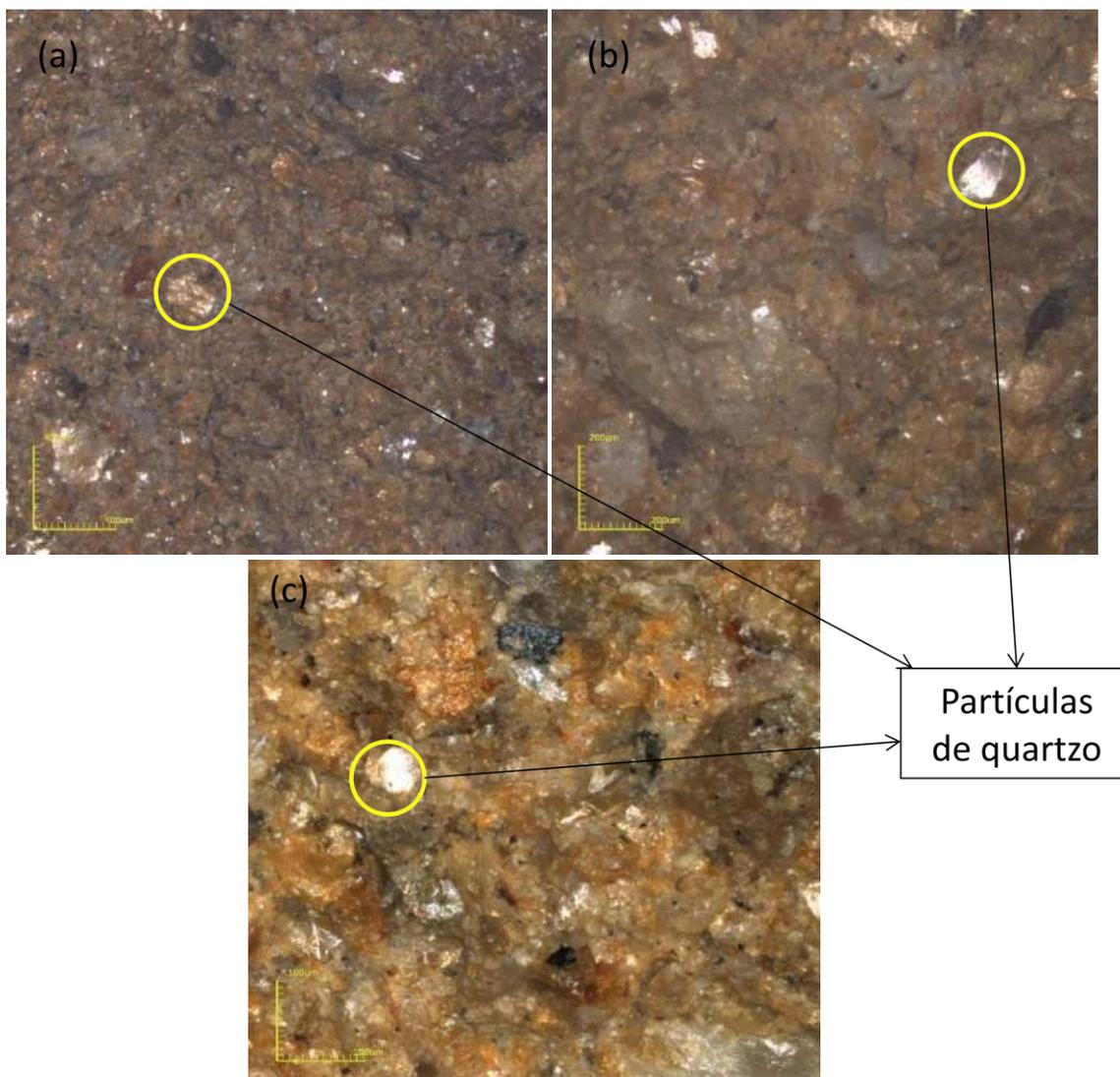


Figura 4.20 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

A Figura 4.21 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 10 % de resíduo de cinza de madeira. Nota-se que as partículas de quartzo estão entre a pasta de cimento, pasta essa formada pelas fases anidras do cimento que em contato com água irão formar principalmente: portlandita (CH), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita. Os produtos de hidratação do cimento, especialmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) são os principais responsáveis pela resistência mecânica após hidratação do cimento.

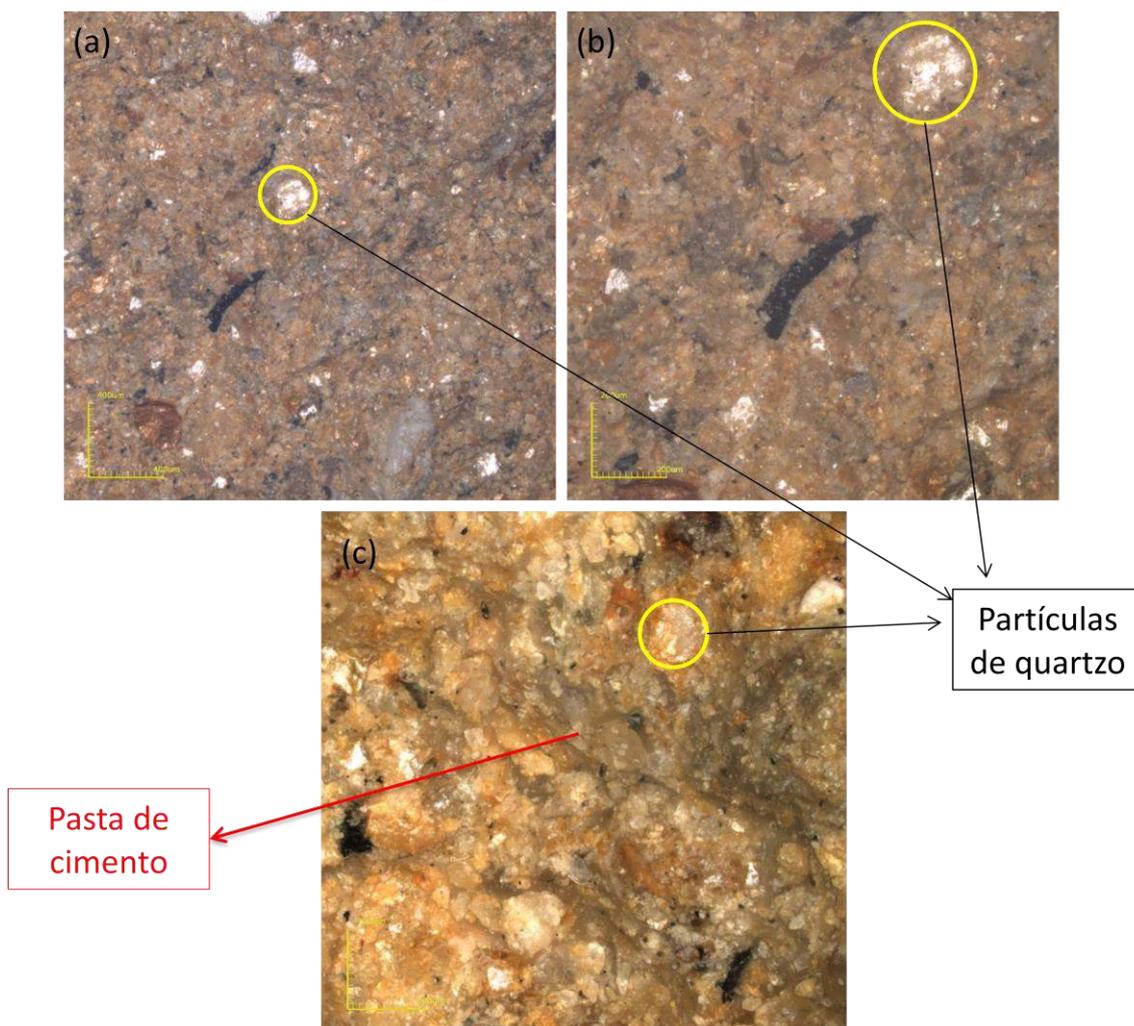


Figura 4.21 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 10 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

A Figura 4.22 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 20 % de resíduo de cinza de madeira. Percebe-se a presença de muitas partículas de quartzo. Verifica-se também a presença de algumas estruturas irregulares e de cor escura que comprovam que o resíduo de cinza de madeira não completou sua combustão. A presença desses aglomerados contribui para a formação de um material mais poroso (Bennack, 2016). A presença de poros nos corpos de prova afeta as suas propriedades mecânicas: reduz sua resistência mecânica e aumenta sua absorção de água como encontrado nas Figuras 4.12 e 4.14, respectivamente.

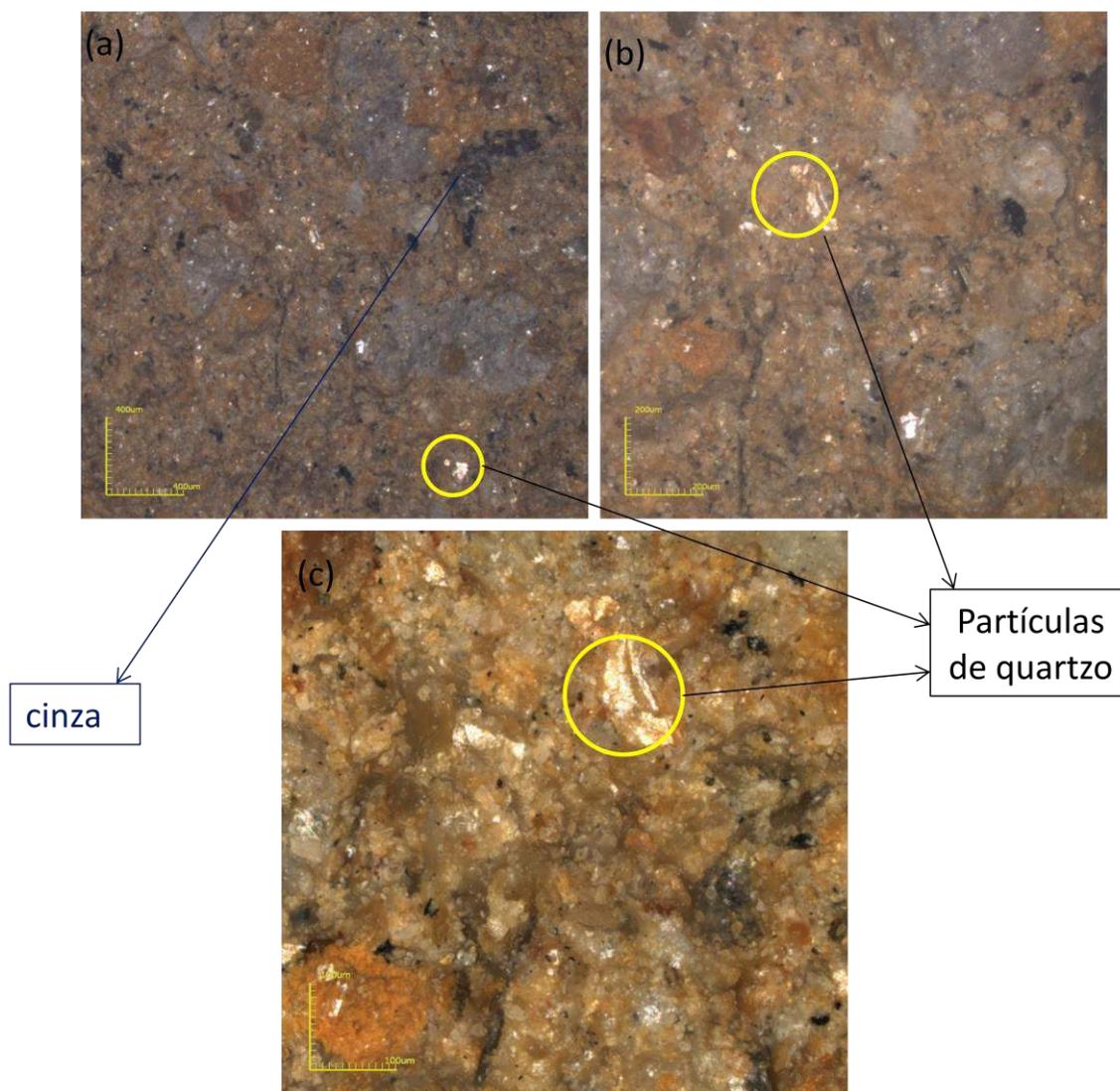


Figura 4.22 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 20 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

A Figura 4.23 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 30 % de resíduo de cinza de madeira. Percebe-se a presença de algumas partículas de quartzo e uma estrutura mais homogênea. Nota-se uma estrutura mais densa que está relacionado à atuação do resíduo de cinza de madeira agindo como fíler e preenchendo os vazios. De uma forma geral, a microestrutura apresenta uma coloração uniforme, indicando que houve uma homogeneização da mistura o que reflete na boa resistência mecânica deste traço.

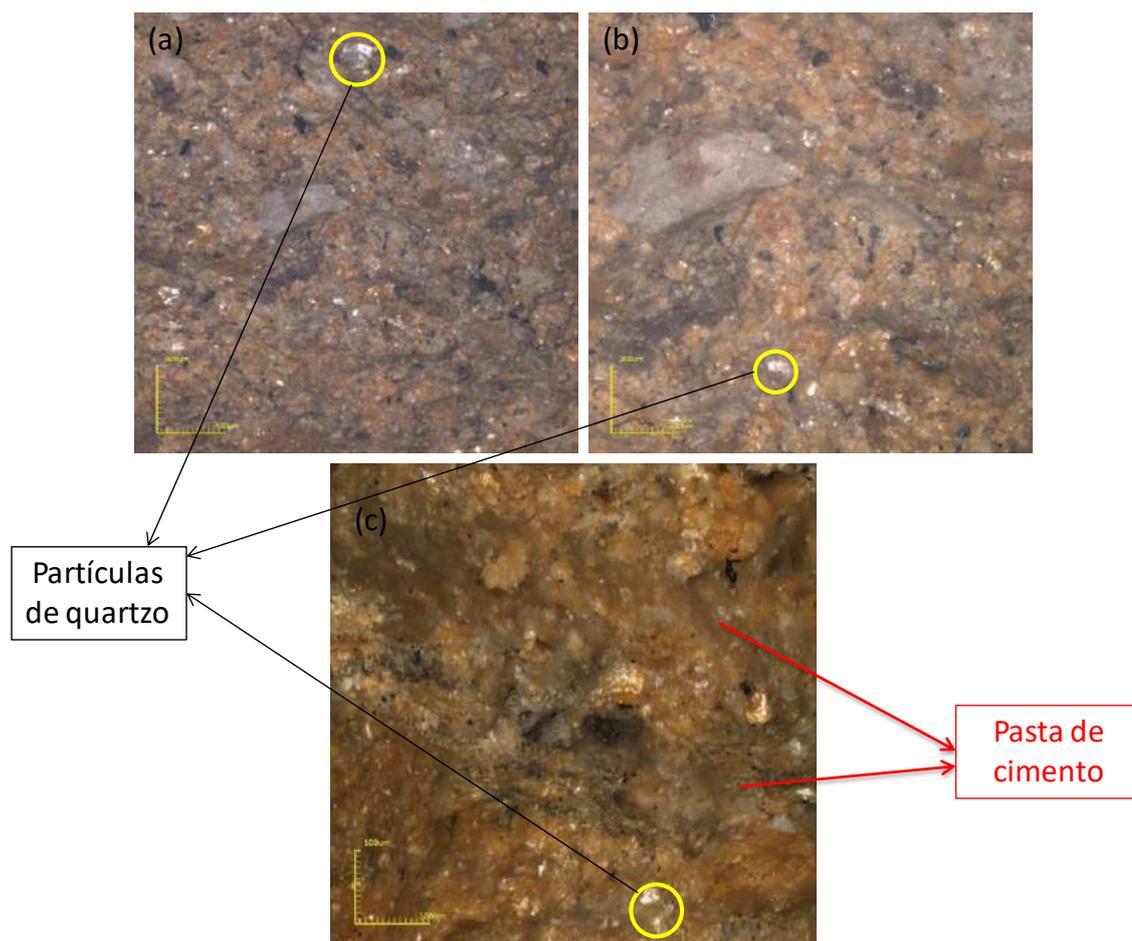


Figura 4.23 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 30 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

A Figura 4.24 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 40 % de resíduo de cinza de madeira. Percebe-se a presença de muitas partículas de quartzo e aglomerados do resíduo e que a homogeneização de todas as massas foi efetiva. Pode ser notado que com o aumento da porcentagem do resíduo, também aumentou os aglomerados do mesmo. Essas estruturas de cinza são responsáveis pela formação de poros que prejudicaram a resistência à compressão simples e aumenta a absorção de água dos corpos cimentícios. Isso pôde ser observado nas Figuras 4.12 e 4.14.

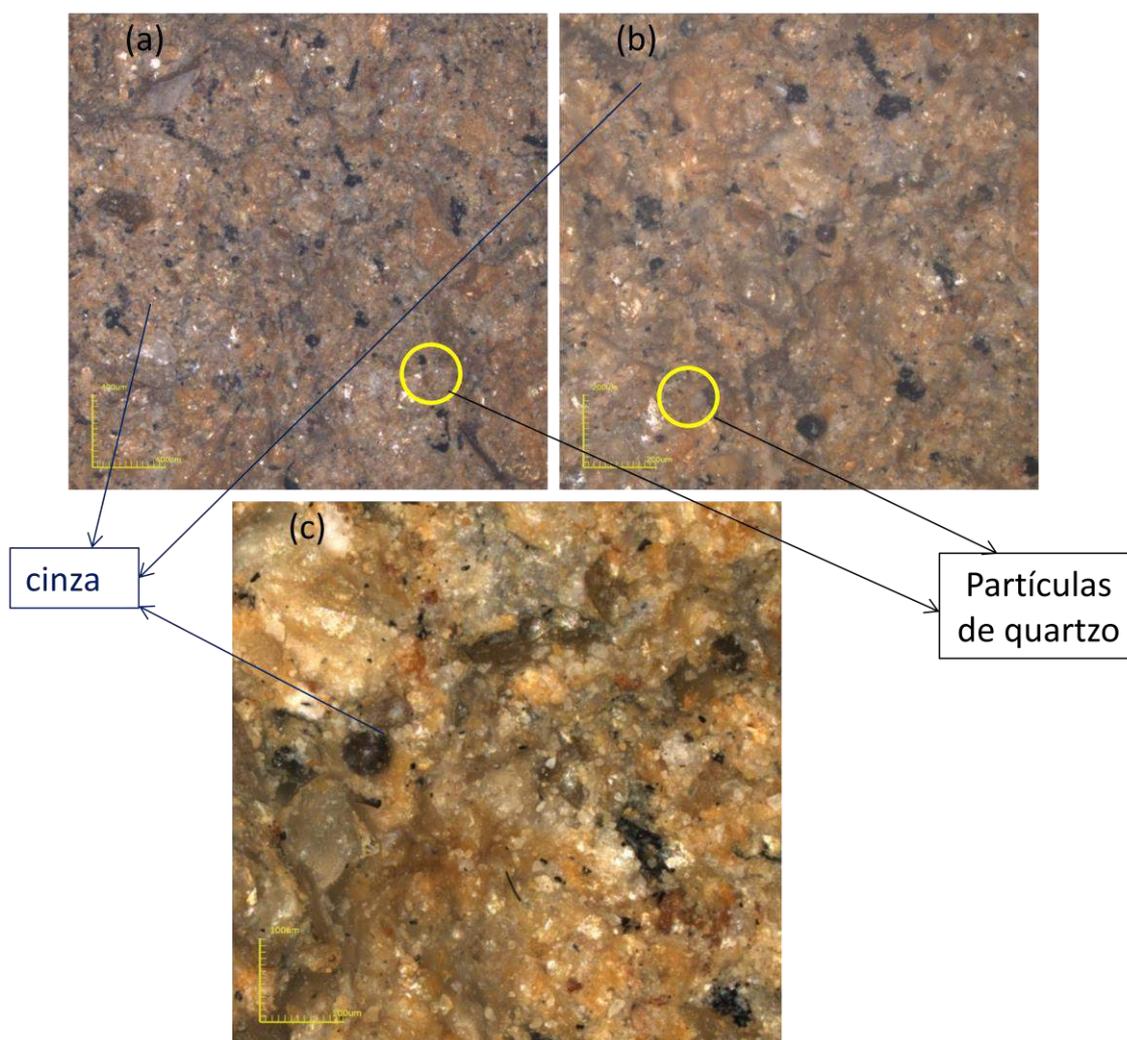


Figura 4.24 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 40 % de resíduo de cinza de madeira: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

Na Figura 4.25 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura obtida por microscopia confocal dos traços estudados com e sem adição de resíduo de cinza de madeira. Analisando as microestruturas dos corpos-de-prova com incorporação de 30 % de resíduo de cinza de madeira, observa-se a formação de uma boa pasta de cimento resultante de uma hidratação do mesmo e um grande empacotamento dos grãos contribuindo com a redução de poros. Essa observação está de acordo com os resultados obtidos nas propriedades físicas: menor absorção de água e grande aumento da resistência mecânica.

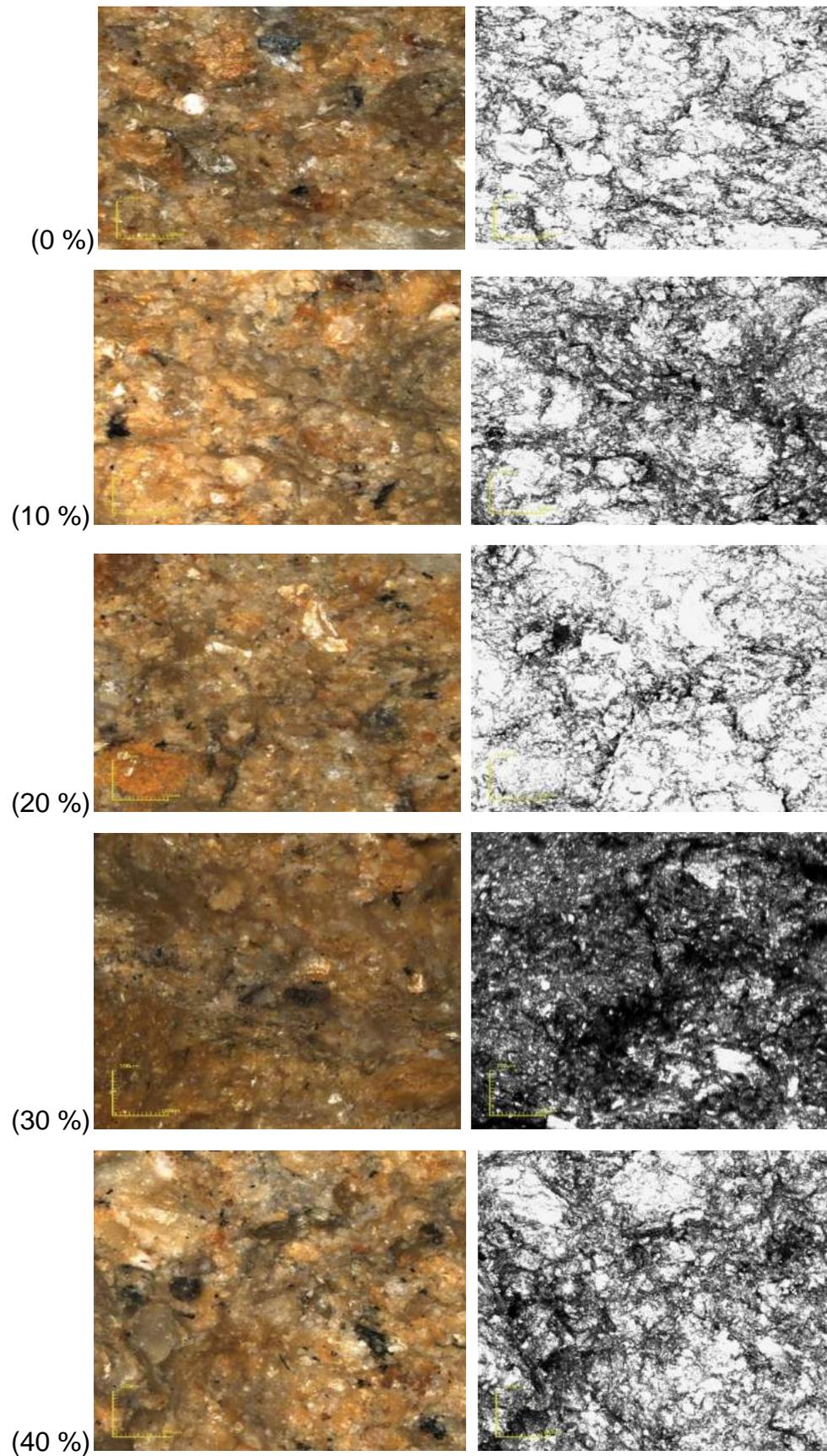


Figura 4.25 – Microestrutura da superfície de fratura para as composições de 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo de cinza de madeira, respectivamente.

4.4.2. Microscopia eletrônica de varredura

A análise microestrutural dos corpos cimentícios serão apresentadas inicialmente com aumento de 200x, 300x, 500x e 800x por traço estudado e, em seguida, será apresentada as micrografias com aumento de 1000x em todos os traços para avaliar o efeito da adição do resíduo na microestrutura da mistura solo-cimento.

A Figura 4.26 apresenta as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aumento de 200x, 300x, 600x e 800x, da superfície de fratura para os corpos de solo-cimento preparados com a massa cimentícia de referência, ou seja, corpos cimentícios sem incorporação de resíduo de cinza de madeira. Todos os corpos cimentícios foram curados durante 28 dias. As setas indicam a formação de poros nas microestruturas. Percebe-se que os corpos de prova sem adição de resíduo apresentam alguns poros.

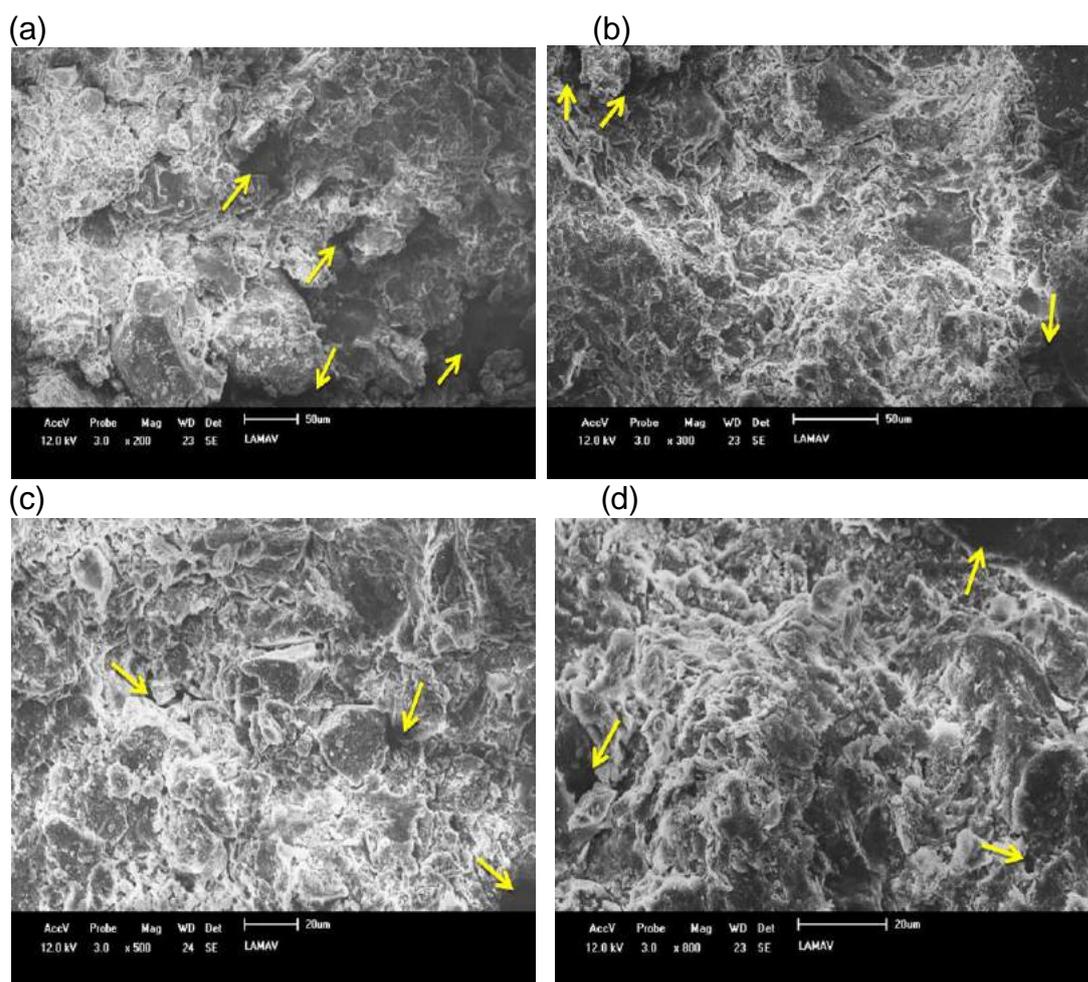


Figura 4.26 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura sem resíduo após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x.

Na Figura 4.27 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura obtida por MEV do traço incorporado com 10% de resíduo. Pode ser verificada a presença de mais poros e de diâmetros maiores em relação ao traço padrão. Constata-se também a presença de estruturas de portlandita resultante do processo de hidratação do cimento.

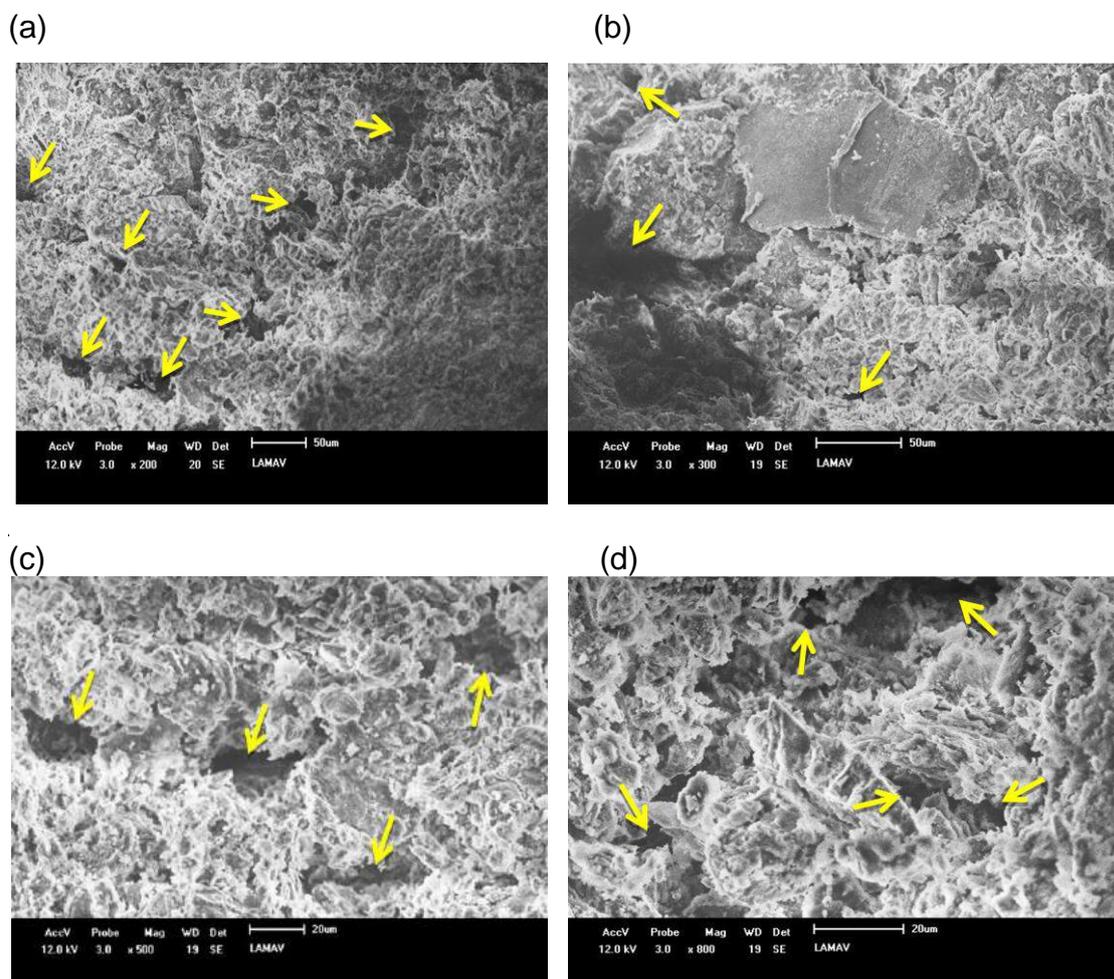


Figura 4.27 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 10 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x.

A Figura 4.28 apresenta as microestruturas dos corpos de prova com adição de 20 % de resíduo de cinza de madeira. Percebe-se a presença de muitos poros de diâmetros de aproximadamente 20 μm refletindo no aumento da absorção de água.

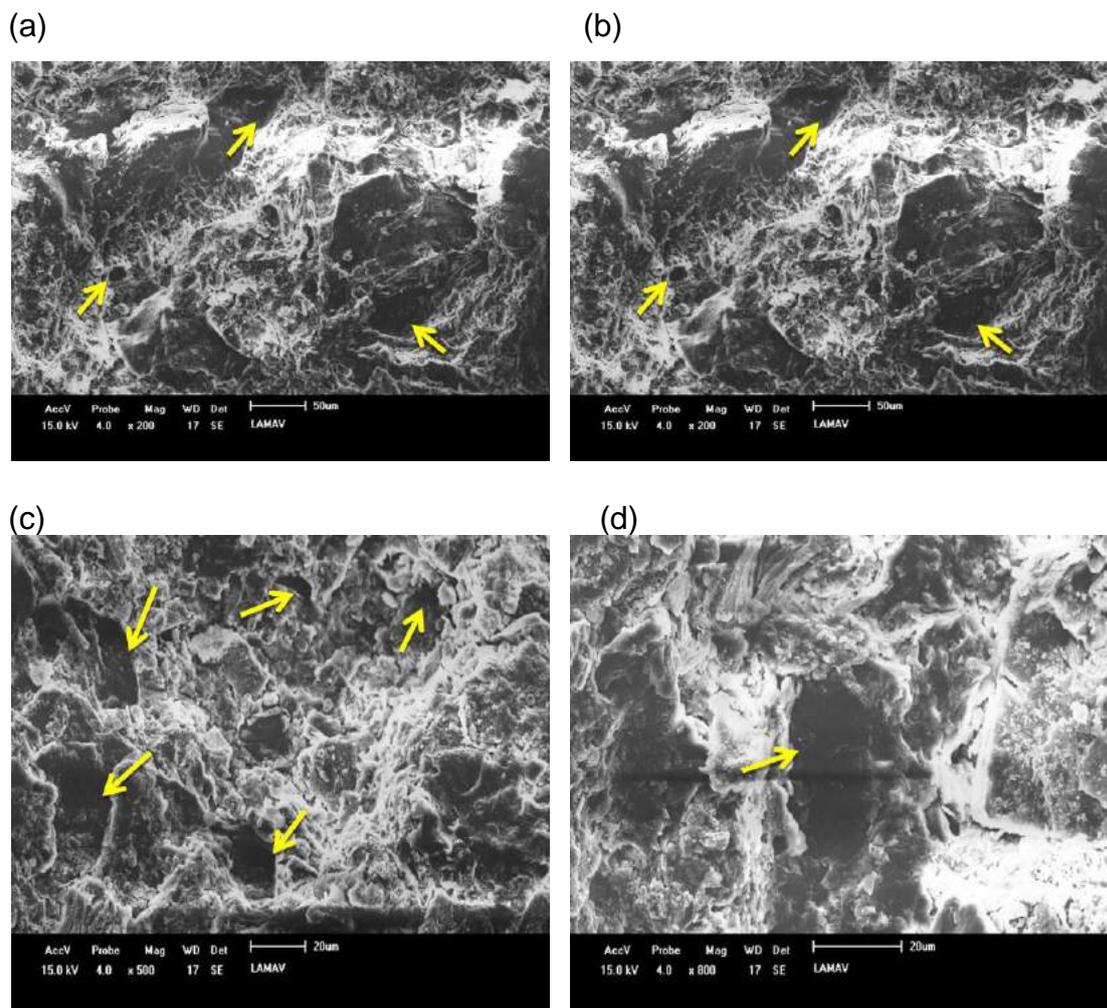


Figura 4.28 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 20 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x.

Na Figura 4.29 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura obtida por MEV do traço incorporado com 30% de resíduo. Verifica-se a presença de poucos poros e uma estrutura bastante compactada o que contribui com uma maior resistência mecânica e maior absorção de água.

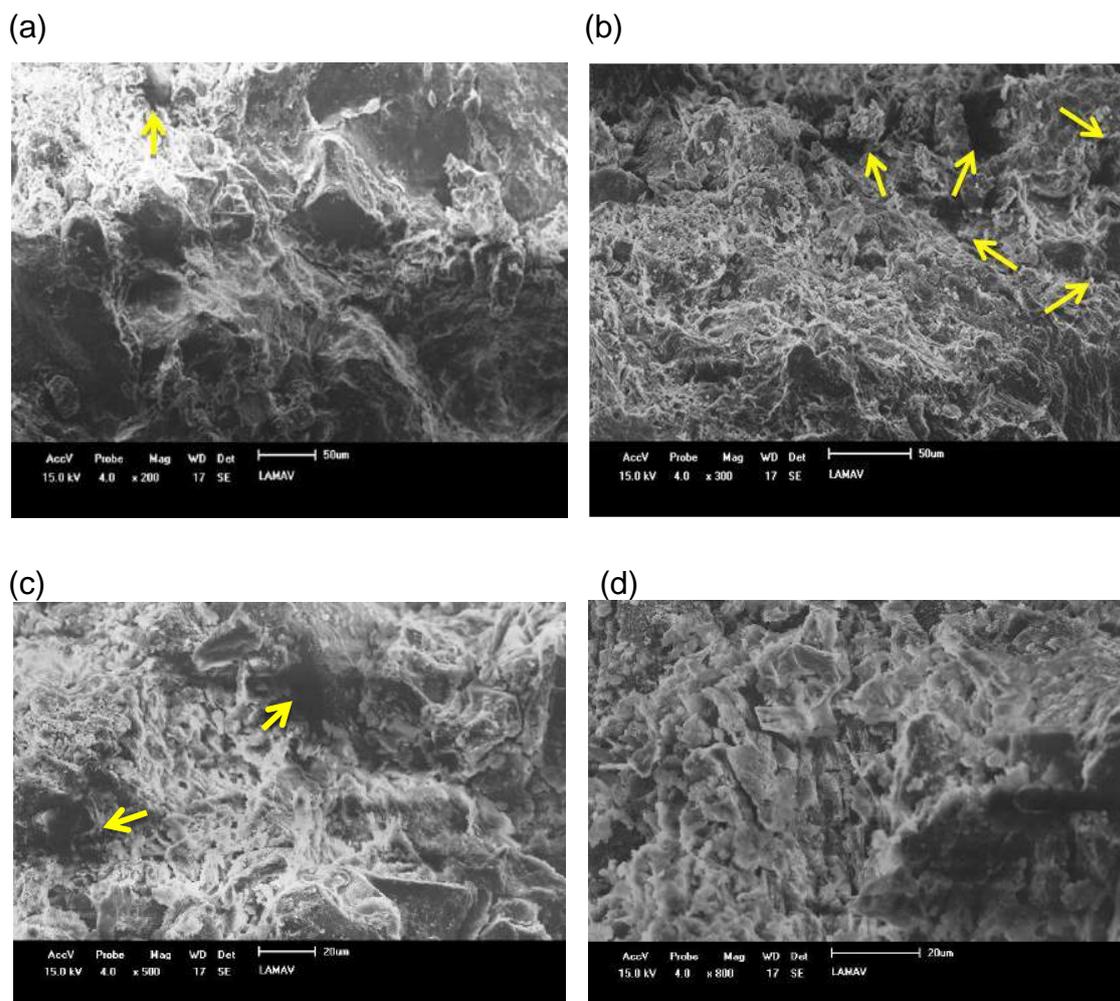


Figura 4.29 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 30 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x.

Na Figura 4.30 é apresentada a microestrutura da superfície de fratura obtida por MEV do traço incorporado com 40% de resíduo. Verificam-se nas microestruturas muitos poros dos mais variados diâmetros além de várias trincas destacados nas figuras.

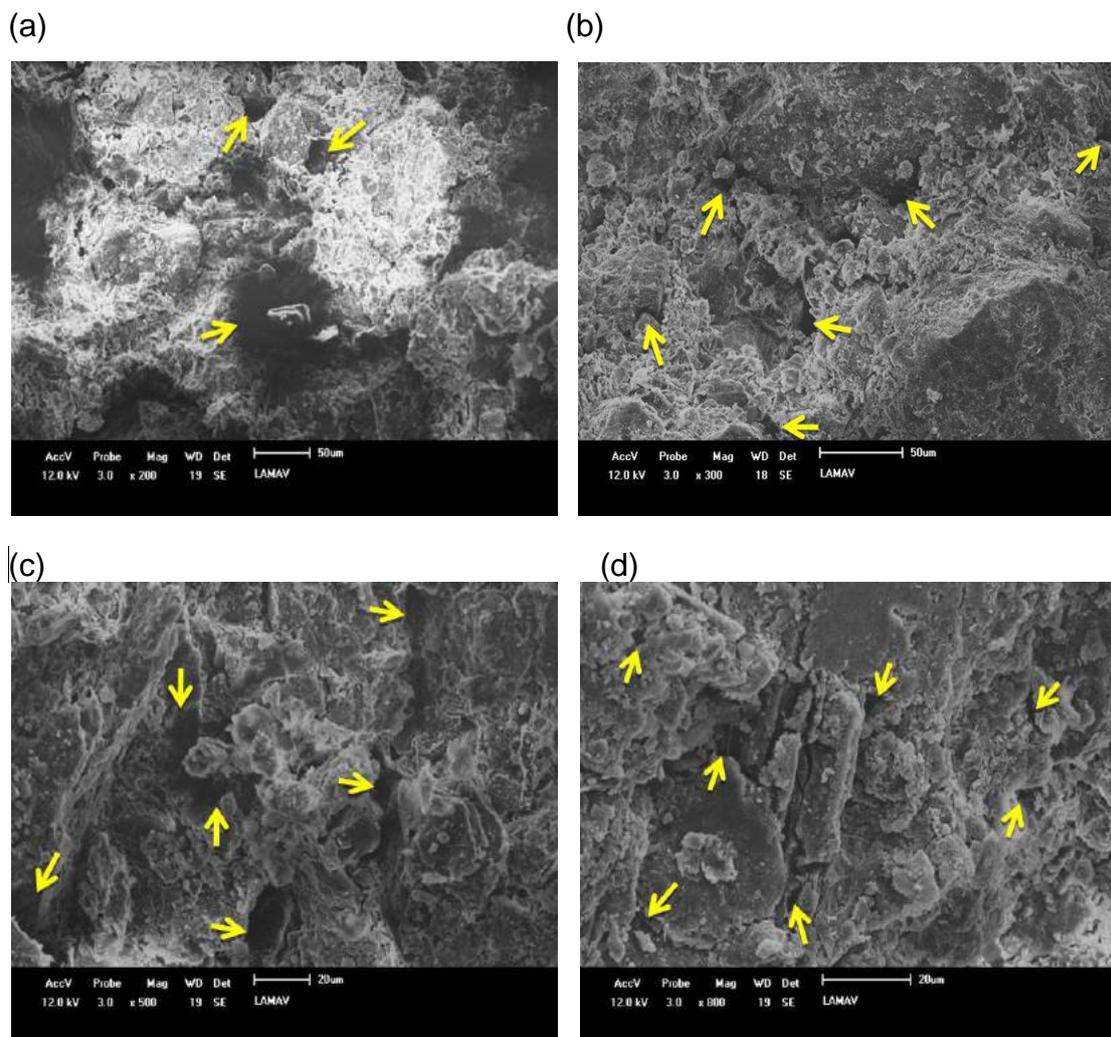
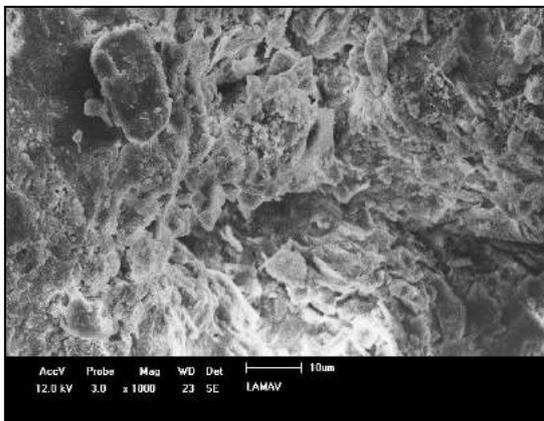


Figura 4.30 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com adição de 40 % de resíduo de cinza de madeira e após 28 dias de cura: (a) 200x; (b) 300x; (c) 500x e (d) 800x.

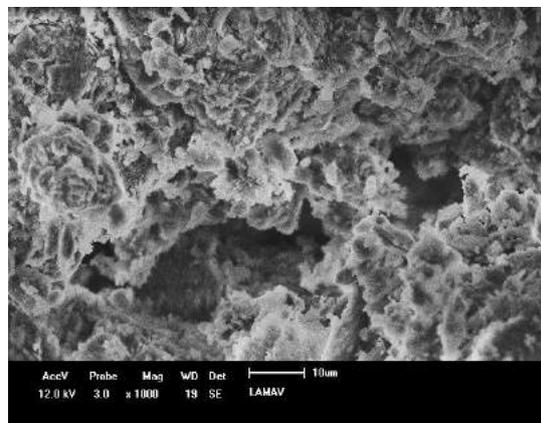
A Figura 4.31 apresenta as microscopias com aumento de 1000x para todos os traços analisados e curados por 28 dias. Pode-se observar que a microestrutura do traço com incorporação de 30 % de resíduo apresenta uma estrutura muito mais densa, com menor número de vazios e trincas comprovando os resultados das propriedades de resistência à compressão simples, massa específica e absorção de água. Esse mesmo traço apresentou uma estrutura mais densa devido à atuação do resíduo de cinza de madeira agindo como fíler e preenchendo os vazios e a formação em grande parte de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que, segundo Amaral (2016), é capaz de

formar uma estrutura mais ininterrupta diminuindo a porosidade do corpo cimentício e contribuindo para aumentar a resistência mecânica por causa de uma boa distribuição de carga na sua interface.

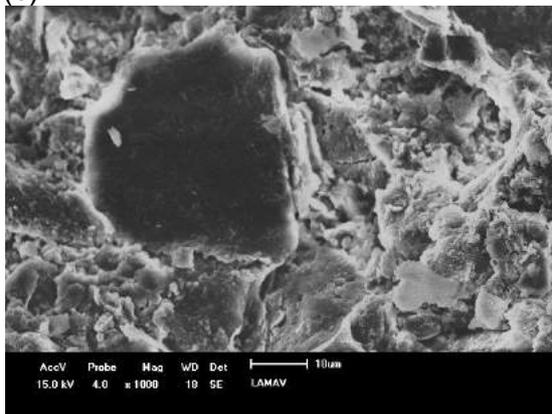
(a)



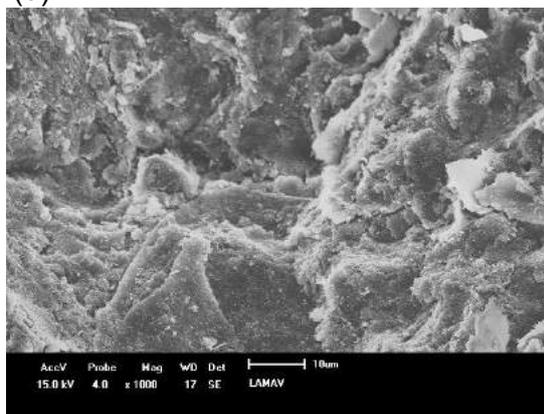
(b)



(c)



(d)



(e)

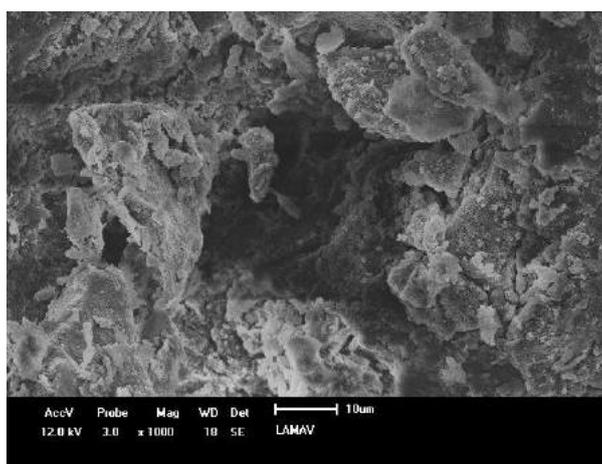


Figura 4.31 – Microestrutura da superfície de fratura da mistura com aumento de 1000 x. Com adição de resíduo de cinza de madeira de: a) 0 %; b) 10 %; c) 20 %, d) 30 % e e) 40 %.

Verifica-se em destaque na microscopia do traço com 20 % de resíduo uma estrutura de hidróxido de cálcio ou Portlandita - Ca(OH)_2 resultante de um dos processos de hidratação do cimento. Essa estrutura apresenta cristais porosos com baixa resistência mecânica e por isso o traço apresentou menor resistência à compressão simples e maior absorção de água.

A microestrutura do traço padrão (sem resíduo) apresentou boa densidade e menor quantidade de poros em relação aos traços com adição de 10, 20 e 40 % de resíduo. Verifica-se que a maior quantidade de cimento Portland no traço de referência contribuiu para um maior empacotamento dos grãos e aumento da densidade e que a substituição de resíduo dos traços acima não foi capaz de manter a mesma densidade. Isso pode ser explicado pela diferença de densidades do cimento Portland e do resíduo de cinza de madeira. À medida que aumentou a quantidade de resíduo (que apresenta menor densidade que o cimento Portland CP III-40) aumentou o número de vazios e diminuiu a densidade final das massas.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

5.1. Conclusões

Na presente tese de doutorado foi estudada a influência da incorporação de resíduo de cinza de madeira na formulação, propriedades e microestrutura de corpos cimentícios para emprego em tijolo solo-cimento. Os resultados experimentais obtidos neste trabalho permitem as seguintes conclusões:

- ✓ O solo arenoso é constituído quimicamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). O solo arenoso apresentou perda ao fogo da ordem de 7,8 %. Do ponto de vista mineralógico, o solo arenoso apresenta um grande percentual de quartzo. Do ponto de vista físico, o solo arenoso utilizado apresenta alto teor de areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$), da ordem de 48 %, resultando em uma distribuição granulométrica dentro dos padrões da ABCP recomendados para a produção de tijolo solo-cimento. O solo arenoso utilizado é um material que apresenta baixa plasticidade ($\text{IP} = 9,5 \%$).
- ✓ Em relação à análise química, o resíduo de cinza de madeira é constituído principalmente por óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO_2), óxido de potássio (7,35 %) e óxido de magnésio (10,79 %). Além disso, o resíduo de cinza de madeira contém perda ao fogo igual a 17,3 % devido à presença de matéria orgânica e calcita. Do ponto de vista mineralógico, o resíduo de cinza de madeira é constituído principalmente por calcita. Do ponto de vista físico, o resíduo de cinza de madeira utilizado é um material não plástico e apresenta baixo teor de partículas finas ($<2 \mu\text{m}$) de 4,8 %. Além disso, o resíduo de cinza de madeira utilizado apresenta atividade pozolânica moderada.
- ✓ O resíduo de cinza de madeira quando incorporado à massa de solo e cimento modifica as características física, química e mineralógica dela.

- ✓ A incorporação de resíduo de cinza de madeira provocou alterações nas propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios de solo-cimento. Foi constatado que o resíduo de cinza de madeira tende a diminuir a resistência à compressão e aumentar a absorção de água dos corpos cimentícios de solo-cimento, exceto para a incorporação de 30 % de resíduo.
- ✓ Análise mineralógica nas amostras incorporadas indicou que a presença de resíduo de cinza de madeira na massa de solo e cimento não modificou as fases cristalinas majoritárias, mas introduziu novas fases como etringita, portlandita e silicato de cálcio hidratado, provenientes da hidratação do cimento e a cristobalita que é uma das formas polimórficas da sílica.
- ✓ Todos os corpos-de-prova incorporados com 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo de cinza de madeira alcançaram os valores mínimos para a resistência à compressão estabelecidos na norma NBR 10834 (ABNT, 2013) e os corpos de prova com 10 e 30 % de resíduo de cinza de madeira apresentaram valores individuais de absorção de água abaixo de 22 % como recomendados pela NBR 10834.
- ✓ Por fim, conclui-se que, a reutilização do resíduo de cinza de madeira na produção de solo-cimento pode ser uma alternativa tecnológica viável, para uma destinação mais apropriada dos resíduos de cinzas de madeira resultante do processo de queima de cerâmica vermelha. Além de ser uma iniciativa importante do ponto de vista ambiental ao contribuir para a redução do consumo de cimento Portland e a inserção de um resíduo inerte em uma composição cimentícia.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a fabricação de tijolos de solo-cimento incorporados com 10 e 30 % de resíduo de cinza de madeira em escala piloto, submetendo-os ao processo de cura e ensaios tecnológicos;

- Reajustar as composições de cimento, resíduo e água a fim de diminuir os valores de absorção de água dos corpos-de-prova;

- Realizar um estudo de comparação de custo de construção com tijolos convencionais x tijolos de solo-cimento incorporados com 30 % de resíduo de cinza de madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRE, J.; ALVES, M. G.; LIMA, T. V. (2006). *Estudo da estabilização de um solo argiloso com adição de cimento - Study of the stabilization of a loamy soil with addition of cement*. Revista Vértices, vol. 8, nº 1/3, jan./dez. CEFET. Campos dos Goytacazes – RJ.

ALVES, A. Óxido de cálcio – CaO. Química Nova interativa. Disponível em <[http://qnint.sbq.org.br/qni/popup_visualizarMolecula.php?id=NPnaBQqHoiBmBOL_Ej4CvLyNJZOrFMMke97mNGEHqx3QRdhABxIFDdxrYVlziYKjeUeGkNg69vO4jb_esjpdQ==](http://qnint.sbq.org.br/qni/popup_visualizarMolecula.php?id=NPnaBQqHoiBmBOL_Ej4CvLyNJZOrFMMke97mNGEHqx3QRdhABxIFDdxrYVlziYKjeUeGkNg69vO4jb_esjpdQ==>)>, acesso em 05 de novembro de 2017.

AMARAL, M. C. (2014). *Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento*. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF. 98 p. Campos dos Goytacazes-RJ.

AMARAL, M. C. (2016). *Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo de lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento*. Tese de doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF. 100 p. Campos dos Goytacazes-RJ.

ANDREOLA, F.; BARBIERI, L.; KARAMANOVA, E.; LANCELLOTTI, I.; PELINO, M. (2008). Recycling of CRT panel glass as fluxing agent in the porcelain stoneware tile production, *Ceramics International*, v. 34, p. 1289-1295.

ANICER, 2015. Relatório anual 2014. Disponível em <www.anicer.com.br>, acesso em 15 de janeiro de 2016.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002). Guia básico de utilização do cimento Portland. 7 ed. 28 p. São Paulo-SP.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1985). *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. Publicações ABCP, São Paulo-SP.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. (1986). *Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio*. São Paulo-SP.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. (2014) *A indústria do cimento e o desenvolvimento do Brasil*. Disponível em < <http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>>, acesso em 12 de janeiro de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. (1992). NBR- 12253: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento. Procedimento. 4p. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. (1994). NBR- 10834: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. 3p. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. (2013). NBR- 12254: Execução de sub-base ou base de solo-cimento. 5p. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. (2004). NBR- 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, RJ.

BATTAGIN, A. F. (2009) *Uma breve história do cimento Portland*. Disponível em < <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>>, acesso em 04/08/2015.

BENNACK, Valéria. (2016). *Análise da viabilidade técnica da reutilização da cinza de madeira em produtos cimentícios*. Dissertação de mestrado em

Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Estadual de Santa Catarina. 133 p. Joinville, SC.

BORLINI, M.C.; SALES, H.F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE; R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. (2005) Firewood ash for application in red ceramic Part I: characteristics of the ash. *Revista Cerâmica*. Nº 51. P. 192 – 196.

BRUXEL, F. R.; OLIVEIRA, E. C.; STULP, S.; MULLER, C. S.; ETCHEPARE, H.D. (2012). Study of the gem residue (sludge) addition in bulk red ceramics. *Revista Cerâmica*. Nº 58. P. 211 – 215.

CABALA, G. V. E. (2007). *Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu*. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN.

CARVALHO, M. B. M. (2008). *Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal*. Dissertação de mestrado em desenvolvimento sustentável. Universidade de Brasília, UNB. Brasília, DF.

CARREIRO, M. E. A.; SANTOS, R. C.; SILVA, V. J.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R., SANTANNA, L. N. L. (2016). Residue of quartzite - alternative raw material for use in structural ceramics. *Revista Cerâmica*. v. 62. p 170-178.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÕES E EQUIPAMENTOS ESCOLARES- CEBRACE. (1981). Solo cimento na construção de escolas – SC01. 2. ed. Rio de Janeiro, MEC/CEBRACE. 39p. (sistemas construtivos 2).

CRUZ, F. J. R. (2012). *Utilização de cinzas de aveloz de fornos cerâmicos para a produção de tijolos e telhas*. Dissertação de mestrado apresentado ao curso de Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco. 76 p. Caruaru-PE.

DENADAI, M. S. (2014). *Avaliação do desempenho operacional e de custos entre enfardadoras no recolhimento de palhico de cana-de-açúcar*. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Ciências Agrônomicas. Mestrado em Agronomia. Universidade Estadual Paulista. 53 p. Botucatu-SP.

EMBRAPA (2013). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª edição. Brasília-DF.

FARIA, J. R. G. (1990). *Unidade de Produção de Tijolos de Solo Estabilizado*. Dissertação de Mestrado. São Carlos – SP: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP. São Carlos-SP.

FERREIRA, R. C.; GLOBO, J. C.; CUNHA, A. H. (2008). *Incorporation of rice and brachiaria husk and their effects on physical and mechanical properties of soil-cement bricks*. Revista Engenharia Agrícola, v. 28, n. 1.

FIGUEROLA, V. (2004). Alvenaria de Solo-Cimento. Revista Técnica Ed. 85. Editora PINI. São Paulo – SP.

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 5 de agosto de 2017.

GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. (2013). Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Química Industrial. Universidade Tecnológica do Paraná. p. 53. Pato Branco-PR.

GRANDE, F. M. (2003). *Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa*. Dissertação de mestrado em Arquitetura. Universidade de São Paulo, USP. São Carlos, SP.

GOMES, F. P. S. (2016). *Valorização de resíduo de cinza de serragem de madeira na produção de piso cerâmico vitrificado*. Dissertação de mestrado apresentado ao centro de Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF. Campos dos Goytacazes, RJ.

HEREK, L. C. S.; HORI, C. E.; REIS, M. H. M.; MORA, N. D.; TAVARES, C. R. G.; BERGAMASCO, R. (2013). Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge, *Ceramics International*, V. 38, p. 951-959.

HWANG, C. L.; HUYNH, T. P. (2015). Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks. *Construction and Building Materials*, v 93, p. 335-341.

Integração entre os Projetos Teto para Todos e Morar Bem viabiliza a entrega da primeira casa construída com tijolos ecológicos à família de baixa renda (2014). Disponível em < <http://www.cambuquira.net/integracao-entre-os-projetos-teto-para-todos-e-morar-bem-viabiliza-a-entrega-da-primeira-casa-construida-com-tijolos-ecologicos-a-familia-de-baixa-renda/>>, acesso em 19 de dezembro de 2015.

KALT, G.; KRANZL, L. (2011). Assessing the economic efficiency of bioenergy Technologies in climate mitigation and fossil fuel replacement in Austria using a techno-economic approach. *Appl Energy*, v. 88, p. 3665-3684.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. (1996). Propriedades mecânicas de argamassas produzidas com entulho de construção civil. Antac, PCC USP, UFSC, p. 137-146. São Paulo-SP.

LIMA, R. C. O. (2010). *Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

LIMA, F. X. R. F. (2013). *Blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento: caracterização para uso em edificações*. Tese de doutorado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília-UNB. 114 p. Brasília-DF.

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.

McKENDRY, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, v. 83. N 1. p 37- 46.

MEDEIROS, E. N. M; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. (2010). Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica. Utilização da técnica de planejamento. (Grog incorporation in ceramic mass to manufacture of bricks. A study of the physical-mechanical properties). *Revista Cerâmica*. Nº 56. p. 399-404.

MENEZES, R. R.; MARQUES, L. N.; SANTANA, L. N. L.; KIMINAMI, R. H. G. A.; NEVES, G. A. FERREIRA, H. S. (2010). Use of electro-fused alumina production waste for the production of ceramic bricks and roof tiles. *Revista Cerâmica*. Nº 56. p. 244-249.

MEIRELES, R. (2014). *Construção com tijolo ecológico (solo cimento)*. Disponível em < <http://robertomeirelesprojetos.blogspot.com.br/2014/04/blog-post.html>>, acesso em 19 de dezembro de 2015.

MEHTA, P.K. Natural Pozzolan. In: *Supplementary Cementing Materials*. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p.

NETO, A. R. (2016). *Impactos da indústria de cerâmica vermelha em Russas (CE)*. Disponível em

<http://www.canalciencia.ibict.br/pesquisa/0309_Impactos_da_industria_de_ceramica_vermelha_em_Russas-Ceara>, acesso em 05 de dezembro de 2017.

NEVES, et. al. (2005). Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra. Práticas de campo. Proterra. Brasil.

NEVES, C. (2006). *O uso de solo-cimento em edificações*. A experiência do CEPED. CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. Universidade do Estado da Bahia. Bahia, BA.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. (2009). Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.13, nº 3, p-353-357. Campina Grande-PB.

Pedroti, L. G., Alexandre, J., Bahiense, A. V., Lima, T. V., Bahiense, A. V., (2007), Processo de Produção de Blocos Cerâmicos de Encaixe Prensados e Queimados. In: *51º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Salvador-BA.

PEDROTI, L. G.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S> N.; VIEIRA, C. M. F.; BAHIENSE, A. V.; MAIA, P. C. A. (2011) Desenvolvimento de Massa Cerâmica para Blocos Queimados e Prensados. *Revista Cerâmica Industrial*. Volume 16, nº 1. p. 25-30.

PENA, R. A. (2015) Tipos de solo II. Disponível em <<http://professorridaltovaz.blogspot.com.br/2015/01/tipos-de-solos-ii.html>> acesso em 13 de março de 2015.

PEREIRA, D. B.; PEZZUTO, C. C. (2010). Estudo do solo-cimento para a fabricação de tijolos ecológicos. Anais do XV encontro de iniciação científica da PUC – Campinas. ISSN – 1982- 0178. Campinas, SP.

PESSOA, F. H. C. (2004). *Análises dos solos de urucu para fins de uso rodoviário*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade de Brasília, UNB. Brasília, DF.

PINHEIRO, B. C. A. (2009). *Processamento e caracterização de massas cerâmicas incorporadas com o resíduo borra de petróleo encapsulada para fabricação de grês porcelanato*. Tese de doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais – Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF. Campos dos Goytacazes, RJ.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M.D. (2010). Utilização de solos arenosos para obtenção de tijolos de solo-cimento. *Revista Cerâmica industrial*, v. 15, n. 5-6. p. 30-36.

PISANI, M. A. J. (2005). Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo-cimento. *Revista Sinergia*. V.6, nº1, p. 53-59. São Paulo-SP.

RAMOS, I. S.; ALVES, M. G.; ALEXANDRE, J. (2006). Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ. *Revista Cerâmica industrial*, v. 11, n. 1. p. 28-32.

REED, J.S. (1995). *Principles of Ceramic Processing*, 2nd edition, Wiley Interscience, New York.

REIS, L.B. SILVEIRA, S. (2000). *Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável: introdução de uma visão multidisciplinar*. Editora da Universidade de São Paulo, USP. 284 p. São Paulo- SP.

RESENDE, D. S. (2013). *Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de Eucalipto como material suplementar*. Tese de doutorado apresentado ao curso de Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Ouro Preto. 166 p. Ouro Preto-MG.

RIBEIRO, S. V.; HOLANDA, J. N. F. (2014). Soil-Cement Bricks Incorporated with Granite Cutting Sludge. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)* Volume 3, Issue 2, March 2014.

RIBEIRO, S. V. *Reutilização de resíduo de rocha ornamental na produção de tijolo solo-cimento*. (2013). Dissertação de mestrado apresentado ao centro de Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF. Campos dos Goytacazes-RJ.

RODRIGUES, M. L. A. (2008). *Adição de resíduos de argamassas mistas na produção de tijolos modulares de solo-cimento*. Dissertação de mestrado em Engenharia do Meio Ambiente. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO.

RODRIGUES, L. P. (2012) *Incorporação de resíduo de estação de tratamento de água em tijolo solo-cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

ROY, M. M.; CORSCADDEN, K. W. (2012). An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic Wood stove. *Appl Energy*, v. 99. p. 206-212.

SALOMÃO, R.; PANDOLFELI, V. C. (2008). Hidratação e desidratação de óxido de magnésio em concretos refratários. *Revista Cerâmica*. v. 54, p. 145-151.

SANTOS, A. D. (2004). *Estudos de propriedades físicas e químicas de um novo cimento selador endodôntico*. Dissertação de mestrado em Ciências de Materiais. Universidade Estadual Paulista- UNESP. Ilha Solteira, SP.

SANTOS, M. P. (2009). *Fabricação de solo-cimento com adição de resíduo de madeira provenientes da construção civil*. Dissertação de mestrado em Construção Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. 108 p. Belo Horizonte-MG.

SANTOS, P. S.(1989) *Ciência e Tecnologia de Argilas*. Ed. Edgard Blucher. 2ª Ed. São Paulo-SP.

SEGANTINI, A. A. S; ALCÂNTARA M. A. M. (2007). Solo-Cimento e Solo-Cal. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1ª. Ed. v.2. São Paulo - SP: IBRACON.

SILVA, S. R. (2005). *Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira*. Dissertação de mestrado apresentado ao curso de Engenharia das Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais. p. 219. Belo Horizonte-MG.

SILVA, F. R. (2008). *Cinza da biomassa florestal: efeitos nos atributos de solos ácidos e na cultura do eucalipto*. Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina. Mestrado em Manejo do solo. 67 p. Lages-SC.

SILVA, M. V. (2011). *Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água*. Dissertação de mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais. Universidade de São Paulo, USB. São Paulo, SP.

SILVA, A. M. F. D. (2013) *Incorporação de cinza de capim-elefante em cerâmica vermelha*. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF. 110 p. Campos dos Goytacazes-RJ.

SILVA, P. H. S.; DIAS, F. A. C.; VIEIRA, B. L. M.; SALLES, P. H. L.; NASCIMENTO, J. C.; TOLEDO, T. A.; BARBOSA, D. B. A. (2016). Estudo da decomposição térmica de calcita. 56º Congresso Brasileiro de química. Belém-PA. Disponível em <<http://www.abq.org.br/cbq/2016/trabalhos/2/10222-18366.html>> acesso em 03 de novembro de 2017.

SILVA, R. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L.; GOMES, O. F. M.; LIMA, L. G. L. M.; MOURA, R. C. A.; TOLEDO FILHO, R. D. (2015). Cinzas de biomassa gradadas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. *Revista Ambiente Construído*. Porto Alegre-RS. v. 15, nº 4, p-321-334.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC – *SNIC 50 anos*. (2006). Rio de Janeiro – RJ. Disponível em < www.snic.org.br>. Acesso em 20/03/2012.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC. (2014). Relatório Anual final de 2013. Rio de Janeiro – RJ. Disponível em < www.snic.org.br>. Acesso em 15/08/2014.

TAVEIRA, E. S. N. (1987) O solo-cimento no campo e na cidade. Construir, morar, habitar. Coleção Brasil Agrícola, Ícone editora. 2ª edição. São Paulo, SP: Ícone Editora, 120 p.

TRIGUEIRO, A. (2014). Biomassa já responde por quase 10 % de toda a matriz energética do Brasil. Disponível em <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2014/10/biomassa-ja-responde-por-quase-10-de-toda-matriz-energetica-do-brasil.html>> acesso em 26 de setembro de 2015.

VASKE, N. R. (2012). *Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto*. Tese de doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 325 p. Porto Alegre-RS.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Journal Fuel*. V. 89. P. 913-933.

VIEIRA, A.; CECHINEL, B.; DEGHEHARD, C.; MAGNUS, D.; HOLTHAUSEN, R.; TASSI, R.; MODESTO, C.; DE NORI JR, A.; CARGNIN, M. (2007). Estudo

do processo de obtenção e caracterização de Tijolos Solo-Cimento. Revista Cerâmica industrial. v. 12, nº 6. p 47-50, novembro/dezembro.

VITALI, O. P. M. (2008). Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil apresentada à Faculdade de Engenharia- Universidade do Porto. Porto – Portugal.

WANG, Z. W. (2013). Study on dynamics performance of biomass based ethyl levulinate blended fuels. Henan Agricultural University.

WANG, Z.; LEI, T.; CHANG, X.; SHI, X.; XIAO, J.; Li, Z.; He, X.; ZHU, J.; YANG, S. (2015). Optimization of a biomass briquette fuel system based on grey relational analysis and analytic hierarchy process: A study using cornstalks in China. Journal Applied Energy.